

# 微生物发酵对菜籽饼粕营养特性改良的研究进展

张寒<sup>1,2</sup>, 郑竟成<sup>1,2</sup>, 罗质<sup>1,3</sup>, 何东平<sup>1,3</sup>, 雷芬芬<sup>1,3</sup>, 陈东<sup>1,2</sup>, 洪坤强<sup>1,2</sup>

(1. 武汉轻工大学食品科学与工程学院, 武汉 430023; 2. 大宗粮油精深加工教育部重点实验室, 武汉 430023; 3. 国家市场监督管理总局重点实验室(食用油质量与安全), 武汉 430023)

**摘要:**菜籽饼粕营养丰富, 但含抗营养因子。为降低菜籽饼粕中抗营养因子, 提高菜籽饼粕的利用率, 促进其规模化开发利用, 介绍了菜籽饼粕中的营养物质、抗营养因子含量, 并从单菌发酵、混菌发酵、菌酶协同发酵等发酵菌株, 以及液态发酵和固态发酵、一步发酵和分步发酵等发酵工艺方面综述了菜籽饼粕抗营养因子降解的研究进展, 探讨了发酵前后菜籽饼粕营养特性的变化, 展望了未来菜籽饼粕微生物发酵技术的研究方向。微生物发酵技术可显著降低菜籽饼粕中的抗营养因子, 提高其饲用价值, 具有广阔的发展空间。今后应从加强宣传推广、选育性能优越的菌株、优化发酵工艺等方面出发促进菜籽饼粕微生物发酵技术的发展。

**关键词:**菜籽饼粕; 微生物发酵; 抗营养因子; 降解; 营养特性改良

中图分类号: TS229; Q936

文献标识码: A

文章编号: 1003-7969(2024)10-0047-10

## Research progress on the improvement of nutritional properties of rapeseed cake and meal by microbial fermentation

ZHANG Han<sup>1</sup>, ZHENG Jingcheng<sup>1,2</sup>, LUO Zhi<sup>1,3</sup>, HE Dongping<sup>1,3</sup>,  
LEI Fenfen<sup>1,3</sup>, CHEN Dong<sup>1,2</sup>, HONG Kunqiang<sup>1,2</sup>

(1. College of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China;

2. Key Laboratory for Deep Processing of Major Grain and Oil, Ministry of Education,

Wuhan 430023, China; 3. Key Laboratory of Edible Oil Quality and Safety

for State Market Regulation, Wuhan 430023, China)

**Abstract:** Rapeseed cake and meal is rich in nutrients, but contains anti-nutritional factors. In order to reduce the content of anti-nutritional factors in rapeseed cake and meal, improve the utilization rate of rapeseed cake and meal, and promote its large-scale development and utilization, the nutrient and anti-nutritional factors in rapeseed cake and meal were introduced, and the research progress on the degradation of anti-nutritional factors in rapeseed cake and meal from the perspectives of single strain fermentation, mixed strain fermentation, strain and enzyme synergistic fermentation, as well as liquid and solid state fermentation, one-step and step-by-step fermentation processes were reviewed. The changes in the nutritional properties of rapeseed cake and meal before and after fermentation were discussed, and the future research direction of the microbial fermentation technology of rapeseed cake and meal was anticipated. Microbial fermentation technology could significantly reduce the anti-nutritional

收稿日期: 2023-06-07; 修回日期: 2024-06-21

基金项目: 2022年湖北省揭榜项目“冷榨菜籽油加工工艺及关键装备研究开发”(08022243); 广西科技计划项目(2022AB39034)

作者简介: 张寒(1997), 女, 硕士研究生, 研究方向为粮食、油脂及植物蛋白(E-mail) zhan\_4823@163.com。

通信作者: 洪坤强, 讲师, 博士(E-mail) hongkq@whpu.edu.cn。

factors in rapeseed cake and meal and improve its feeding value, which had a broad development space. In the future, the development of microbial fermentation technology for rapeseed cake and meal should be promoted by strengthening publicity and promotion, selecting and breeding strains with superior performance, and optimizing the fermentation process.

**Key words:** rapeseed cake and meal; microbial fermentation; anti - nutritional factor; degradation; improvement of nutritional property

油菜是世界主要油料作物之一,油菜籽是食用油和植物蛋白的重要原料,在我国经济发展中占据重要地位。2020 年全球油菜种植面积和油菜籽产量分别为 3 610.7 hm<sup>2</sup> 和 7 179.6 万 t,我国油菜种植面积和油菜籽产量分别为 680 hm<sup>2</sup> 和 1 400 万 t,其中油菜籽产量占全球的 19.5%,位居世界前三<sup>[1]</sup>。油菜籽经过压榨、浸出等工艺制油后获得的副产物菜籽饼粕,具有营养丰富、来源广泛等特点。然而,大豆粕以高蛋白质含量的优势,优先应用于饲料行业,菜籽饼粕次之。主要原因在于:一是菜籽饼粕中存在大量的抗营养因子,严重制约了菜籽饼粕的深度开发利用;二是禽畜对菜籽蛋白的消化利用率低;三是油菜种植区分散,农户对菜籽饼粕处理知识匮乏,造成资源浪费。

随着畜牧养殖业的不断发展,蛋白饲料原料的需求逐渐增大,造成供需不足,同时受后疫情时代和国际贸易摩擦的影响,大豆、鱼粉进口受限,因此提高菜籽饼粕高值化利用水平刻不容缓。菜籽饼粕的脱毒方法主要分为物理法、化学法和生物法 3 大类。物理法脱毒主要是利用高温处理钝化菜籽饼粕中的芥子酶活性,使有害的挥发性物质(如腈类物质)随蒸汽逸出,但物理法脱毒所用设备操作复杂、对营养成分破坏性强、干物质损失较大,不利于规模化脱毒<sup>[2]</sup>。化学法脱毒的主要原理是针对菜籽饼粕中某一种有毒物质的特性加入对应的试剂使其发生化学反应,其优点是单一成分针对性强<sup>[3]</sup>,但存在脱毒范围小、脱毒效果不均匀、化学残留、脱毒后废液处理成本较高等缺点<sup>[4]</sup>,较少应用于菜籽饼粕的营养特性改良。生物法中最常用的脱毒技术是酶法脱毒和微生物发酵脱毒。酶法脱毒专一性强,但酶价格高不易推广。微生物发酵脱毒是利用微生物发酵降低菜籽饼粕中的抗营养因子含量,在一定条件下还可以产生新的有益成分,例如吡嗪类、壬醛等诱食性香味物质<sup>[5-6]</sup>。相较于其他脱毒方法,微生物发酵法具有成本低、无毒害物质残留、反应条件温和等优点,在降解抗营养因子的同时还可提高菜籽饼粕的营养价值。

目前,关于微生物发酵对菜籽饼粕营养特性改良的研究与应用已有诸多报道,本文主要就菜籽饼粕中的营养物质、抗营养因子含量及微生物发酵工艺进行了综述,并展望了未来菜籽饼粕微生物发酵技术的研究方向,以期能为发酵菜籽饼粕规模化开发

利用提供理论依据和技术工艺参考。

## 1 菜籽饼粕中的营养物质与抗营养因子

### 1.1 菜籽饼粕中的营养物质

菜籽饼粕中的营养物质主要包括蛋白质、碳水化合物、脂肪、维生素、矿物质等<sup>[7-9]</sup>。菜籽饼粕主要营养成分含量见表 1。

表 1 菜籽饼粕主要营养成分含量

Table 1 Main nutrient content of rapeseed cake and meal

营养成分	含量	参考文献
粗蛋白质/%	35 ~ 42	[10]
碳水化合物/%	20 ~ 25	[10]
粗纤维/%	12 ~ 13	[10]
中性洗涤纤维/%	16.6 ~ 26.6	[11]
酸性洗涤纤维/%	11.7 ~ 12.8	[11]
粗脂肪/%	1.6 ~ 14.4	[11]
水分/%	4.7 ~ 8.3	[11]
灰分/%	7.0 ~ 7.3	[11]
矿物质/%	7 ~ 8	[12]
维生素/(g/kg)	>6.7	[13]
精氨酸/(g/kg)	20.6 ~ 24.1	[8]
组氨酸/(g/kg)	10.0 ~ 12.0	[8]
异亮氨酸/(g/kg)	13.8 ~ 15.6	[8]
亮氨酸/(g/kg)	25.4 ~ 27.6	[8]
赖氨酸/(g/kg)	17.2 ~ 24.1	[8]
甲硫氨酸/(g/kg)	7.4 ~ 9.7	[8]
苯丙氨酸/(g/kg)	12.3 ~ 15.3	[8]
苏氨酸/(g/kg)	17.5 ~ 19.1	[8]
色氨酸/(g/kg)	4.6 ~ 5.4	[8]
缬氨酸/(g/kg)	18.6 ~ 23.8	[8]

菜籽饼粕作为优质的植物蛋白资源,其蛋白质含量低于大豆粕,但氨基酸组分均衡度优于大豆粕<sup>[14]</sup>,尤以甲硫氨酸、半胱氨酸、赖氨酸含量较高<sup>[15]</sup>。菜籽饼粕中含有大量的铜、铁、锰、锌、硒等矿物质元素,还含有丰富的维生素,如 V<sub>B3</sub>、V<sub>B4</sub>、V<sub>B5</sub>、V<sub>B9</sub> 等,另外,菜籽饼粕中富含胆碱,含量高达 6 700 mg/kg<sup>[13]</sup>。

菜籽蛋白的主要成分是 12S 球蛋白和 2S 清蛋白<sup>[16]</sup>。其中:12S 球蛋白分子质量约 300 kDa,由 6 个亚基组成,每个亚基是由 2 条分子质量在 20 ~ 30 kDa 的  $\alpha$  螺旋和  $\beta$  折叠多肽链通过二硫键连接而成<sup>[17]</sup>;2S 清蛋白分子质量约 13 kDa,由 2 条分子质量在 4 ~ 9 kDa 的多肽链以 2 个二硫键结合构

成<sup>[18]</sup>。菜籽饼粕中氨基酸、肽、蛋白质的含量及消化利用率是其作为饲用蛋白资源品质和禽畜类对其营养物质吸收和利用效率的重要评价指标。菜籽饼粕中蛋白质含量虽高,但分子质量比较大,结构大多排列紧密,难以直接被动物消化吸收,尤以压榨获得的菜籽饼粕最为显著。

### 1.2 菜籽饼粕中的抗营养因子

菜籽饼粕中的抗营养因子主要有硫代葡萄糖苷、单宁、植酸、芥酸、芥子碱以及硫代葡萄糖苷的系列降解产物,其中硫代葡萄糖苷、单宁、植酸的抗营养作用尤为突出,严重制约了菜籽饼粕的高值化利用。菜籽饼粕抗营养因子含量见表2。

表2 菜籽饼粕抗营养因子含量

抗营养因子	含量	参考文献
硫代葡萄糖苷/%	0.5~7	[19]
单宁/%	0.5~1.5	[19]
植酸/%	4.5~7	[19]
芥子碱/%	0.6~0.8	[20]
芥酸/%	<0.2	[15, 21-22]
异硫氰酸酯*/(mg/kg)	≤4 000	[23]
噁唑烷硫酮*/(mg/kg)	≤2 500	[23]

注: \* 表示 GB 13078—2017《饲料卫生标准》限量要求

Note: " \* " represents the limit requirement of GB 13078 - 2017 Hygienical standard for feed

硫代葡萄糖苷又称硫苷、芥子苷,是菜籽饼粕中的主要抗营养因子,是一种结构复杂且较为稳定的含硫化合物,易溶于水、甲醇、乙醇等溶剂<sup>[24]</sup>。硫苷种类繁多,根据侧链结构的差异,可分为芳香族、吡啶族、脂肪族3类<sup>[25]</sup>。硫苷本身无毒,但植物细胞内同时存在硫苷和芥子酶,当植物细胞受到外力作用而破碎时,附着于细胞内膜的芥子酶与液泡内的硫苷接触,酶解硫苷产生异硫氰酸酯、噁唑烷硫酮、硫氰酸盐、腈类化合物等有毒有害的代谢产

物<sup>[26-27]</sup>。含 $\beta$ -羟基的硫苷酶解后自身环化形成噁唑烷硫酮,家禽吸收后会干扰碘元素的吸收转化,造成甲状腺肿大<sup>[28]</sup>;带苦味的异硫氰酸酯和噁唑烷硫酮不仅会降低禽畜类的采食量,而且会引起胃肠黏膜局部炎症甚至坏死<sup>[29-30]</sup>。酶解硫苷转化产生的不同次级代谢产物,其毒性大小依次为腈类>噁唑烷硫酮>异硫氰酸酯>硫氰酸酯<sup>[31]</sup>。腈类物质毒性最强,但极易挥发<sup>[32]</sup>,同时腈类物质在油菜籽压榨过程中会出现热裂解,因而大部分进入环境,较少量残留在菜籽饼粕中。

单宁又称鞣酸、植物多酚,是植物体内除木质素外含量最丰富的复杂酚类次生代谢产物<sup>[33]</sup>,菜籽饼粕中的单宁以缩合单宁为主,主要存在于油菜籽种皮中,不仅具有辛辣味和苦涩味,而且在中性和碱性条件下易发生氧化聚合反应,造成菜籽饼粕发黑。除此之外,单宁易与蛋白质、多糖等物质结合,形成难以消化的螯合物,从而降低营养物质的利用率和消化率<sup>[34-35]</sup>。

植酸又称环己六醇六磷酸酯,通常以肌醇磷酸钙、镁复盐形式存在于油料作物、谷类种子中<sup>[36]</sup>。非反刍动物体内没有植酸酶<sup>[36]</sup>,所以对植酸盐的利用率低,从而易患微量元素缺乏症。另外,植酸进入禽畜类消化道会与 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$ 等金属阳离子结合形成难溶性的植酸盐络合物,可降低动物对矿物质元素的吸收利用,同时还会抑制淀粉酶、胃蛋白酶、脂肪酶等活性<sup>[37]</sup>。

## 2 微生物发酵改良菜籽饼粕营养特性

### 2.1 发酵菌株

不同微生物对菜籽饼粕中抗营养因子的脱除效果不同,因此筛选优良的发菌菌株是降解抗营养因子的首要条件。目前国内外研究中关于微生物发酵菜饼籽粕的优势菌已有诸多报道,发酵菌株对菜籽饼粕营养特性改良的影响见表3。

表3 发酵菌株对菜籽饼粕营养特性改良的影响

微生物	升高率/%		降解率/%					粗纤维	参考文献
	粗蛋白质	多肽	硫苷	植酸	单宁	异硫氰酸酯	噁唑烷硫酮		
黑曲霉	-	226.46	43.07	86.09	-	55.64	44.68	-	[17]
黑曲霉	23.02	-	76.89	44.60	-	-	-	9.12(NDF)	[38]
黑曲霉	15.55	222.27	44.80	-	-	56.36	-	14.45(NDF) 9.77(ADF)	[39]
里氏木霉	23.0	-	99.1	-	-	-	-	4.02(ADF) 2.12(NDF)	[40]
少孢根霉	65.4	-	43.1	42.4	-	-	34.0	25.5	[41]
少孢根霉	6.3	-	14.3	-	26.2	-	-	26.43(NDF)	[42]

续表 3

微生物	升高率/%			降解率/%				粗纤维	参考文献
	粗蛋白质	多肽	硫甙	植酸	单宁	异硫氰酸酯	噻唑烷硫酮		
短乳杆菌/短小芽孢杆菌	1.91	-	-	24.22	35.81	92.20	100	-	[43]
德氏乳杆菌/枯草芽孢杆菌	-	-	94.62	-	-	-	-	-	[44]
枯草芽孢杆菌/纳豆芽孢杆菌/凝结芽孢杆菌/侧胞芽孢杆菌	-	-	-	93.74	14.75	-	-	36.59	[45]
枯草芽孢杆菌/雅致放射毛霉	14.05	170.45	61.96	31.87	-	100	100	15.53	[4]
嗜酸乳杆菌/枯草芽孢杆菌/酿酒酵母	10.39	155.95	52.63	-	-	-	-	4.29	[46]
地衣芽孢杆菌/酵母菌/乳杆菌	12.09	454.62	85.1	-	-	-	-	14.64(NDF)	[47]
产热假丝酵母/土曲霉/黄梗霉属	27.4	-	98.0	28.3	-	-	-	66.2	[48]
嗜酸乳杆菌/枯草芽孢杆菌/酿酒酵母	7.27	-	35.73	-	-	-	-	11.00	[49]
黑曲霉/啤酒酵母/枯草芽孢杆菌/保加利亚乳杆菌	-	-	76.87	82.58	-	78.57	-	-	[50]

注：- 表示未检测；NDF 表示中性洗涤纤维；ADF 表示酸性洗涤纤维

Note: -. Not detected; NDF. Neutral detergent fiber; ADF. Acid detergent fiber

菜籽饼粕发酵菌株中常见的细菌有地衣芽孢杆菌 (*Bacillus licheniformis*)、枯草芽孢杆菌 (*Bacillus subtilis*)、蜡样芽孢杆菌 (*Bacillus cereus*)、乳杆菌 (*Lactobacillus* sp.)、粪肠球菌 (*Enterococcus faecalis*) 等;常见的真菌有白地霉 (*Geotrichum candidum*)、黑曲霉 (*Aspergillus niger*)、短梗霉 (*Aureobasidium* sp.)、少孢根霉 (*Rhizopus oligosporus*)、里氏木霉 (*Trichoderma reesei*) 等;常见的酵母菌有产朊假丝酵母 (*Candida utilis*)、毕赤酵母 (*Pichia pastoris*)、酿酒酵母 (*Saccharomyces cerevisiae*) 等。其中,枯草芽孢杆菌是菜籽饼粕发酵使用率最高的菌种,其生命力强、易培养,且芽孢耐高温,可分泌  $\alpha$ -淀粉酶、纤维素酶、蛋白酶、植酸酶、脂肪酶等多种酶,与动物消化道酶一起可将蛋白质、纤维素等大分子物质降解成小分子,提高发酵底物中营养物质的利用率<sup>[51-52]</sup>。

### 2.1.1 单菌发酵

单一菌株发酵菜籽饼粕针对性强、操作简便、工艺简单,可针对不同目的改善菜籽饼粕的营养特性。单菌发酵对菜籽饼粕中抗营养因子的脱除效果不同主要是因为菌种自身分泌的酶种类不同,一种酶只能降解部分抗营养因子。

蛋白酶是霉菌的主要分泌酶<sup>[53]</sup>。黑曲霉可分

泌多种胞外降解酶,如内切葡聚糖酶、蛋白酶、半纤维素酶、纤维素酶、脂肪酶、植酸酶、单宁酶<sup>[54]</sup>。里氏木霉具有高效的蛋白质分泌能力,被应用于多种外源蛋白表达<sup>[55]</sup>。采用里氏木霉发酵菜籽粕,粗蛋白质含量增加了 23.0%<sup>[40]</sup>。少孢根霉具有较强的脂解和蛋白质水解活性,可提高发酵底物的可溶性蛋白质和可溶性氮含量,是发酵制品的理想菌株<sup>[42]</sup>。在菜籽粕中接种少孢根霉后,其硫苷、噻唑烷硫酮、植酸、粗纤维含量均有不同程度下降,粗蛋白质含量增加 65.4%,接种前后菜籽粕中总磷含量保持一致<sup>[41]</sup>。

芽孢杆菌最大的优点是性价比优异,使用成本远低于乳酸菌和酵母菌,功能全面,耐受性好,使用范围广。枯草芽孢杆菌和雅致放射毛霉均可生产中性蛋白酶<sup>[51, 56]</sup>。管维等<sup>[45]</sup>发现枯草芽孢杆菌在固态发酵中对纤维素的降解具有明显作用。此外,用枯草芽孢杆菌进行菜籽粕固态发酵实验表明,菜籽多肽得率随着发酵时间的延长呈现先上升后下降趋势<sup>[57]</sup>。这是由于发酵初期,枯草芽孢杆菌分泌的蛋白酶将菜籽蛋白酶解为多肽,使得菜籽多肽含量升高,发酵后期,蛋白酶进一步酶解菜籽蛋白和菜籽多肽生成游离氨基酸,使得多肽含量降低。刘平等<sup>[34]</sup>

选用枯草芽孢杆菌、植物乳酸菌、黑曲霉、酿酒酵母探究单菌发酵对菜籽粕中单宁含量的影响,结果表明,经黑曲霉发酵的菜籽粕中单宁含量远低于其他3种菌株,枯草芽孢杆菌对单宁含量无明显影响,这与孙林等<sup>[58]</sup>所得黑曲霉是脱除单宁最优菌种的结论一致。枯草芽孢杆菌对单宁的脱除率较低,是由于枯草芽孢杆菌主要分泌蛋白酶和淀粉酶,无法降解单宁。研究发现,短小芽孢杆菌和多黏芽孢杆菌对单宁具有降解作用<sup>[43, 59]</sup>。

乳酸菌主要分泌脂肪酶、产酸酶、多糖酶<sup>[60]</sup>,在发酵时可产生大量乳酸和其他有机酸,降低基质pH,改善动物肠道菌群结构,抑制病原微生物的生长。相较于其他发酵菌株,植物乳杆菌对各种糖类利用能力最佳,硫苷属于葡萄糖衍生物,因此绝大多数研究者选用植物乳杆菌作为发酵菌株脱除硫苷。吴正可等<sup>[61]</sup>以菜籽粕中的硫苷为唯一碳源,以从发酵青贮与土壤混合液中筛选出的嗜酸乳杆菌为发酵菌株,发酵48 h后硫苷降解率为23.69%,菜籽粕表面由光滑变为疏松多孔,且嗜酸乳杆菌在发酵过程中可产生大量的有机酸,散发出浓郁的酸甜芳香味。酸甜芳香味可刺激牲畜的嗅觉器官,缓解因外部环境改变引起的采食量下降等情况。邱良伟等<sup>[62]</sup>也发现菜籽粕经植物乳杆菌发酵48 h后,异硫氰酸酯、噁唑烷硫酮、总硫苷含量分别降低35.99%、67.81%、55.52%。另外,李莉娜等<sup>[63]</sup>采用粪肠球菌、酿酒酵母、植物乳杆菌单菌发酵菜籽粕,发现酿酒酵母发酵菜籽粕中真蛋白含量最高,硫苷和单宁含量最低,主要原因在于酿酒酵母能很快地利用发酵底物中的可发酵性糖类物质合成菌体蛋白,从而解除终产物遏制作用。

单一菌株可专一性地降解菜籽饼粕中某一类型的抗营养因子,但菜籽饼粕中抗营养因子种类繁多且结构复杂<sup>[26]</sup>,使用单一菌株发酵,可能无法制备高蛋白、高多肽、低毒的菜籽饼粕饲料。

### 2.1.2 混菌发酵

混菌发酵可利用多种菌株组合发酵,具有微生物种类多、数量大、易培养、繁殖快、产酶丰富,且多菌株共生分泌的不同酶互为补充,从而产生更丰富的营养物质的特点。在发酵过程中,可利用混菌菌株之间的协同效果和互补作用共同发酵菜籽饼粕,从而弥补单菌发酵不充分、底物利用率低的问题,达到对菜籽饼粕全面脱毒的目的。另外,在发酵过程中植物蛋白被微生物吸收利用,转化为菌体蛋白的同时消耗了底物中的碳水化合物,从而出现“蛋白质浓缩”效应,对于进一步提高菜籽饼粕的营养价

值和饲用价值具有重要意义。

德氏乳杆菌具有较强的耐酸性,能充分利用菜籽粕中的植物蛋白及非蛋白氮转化为菌体蛋白,并直接用于动物喂养<sup>[64]</sup>。Zhang等<sup>[44]</sup>以Box-Behnken响应面法优化德氏乳杆菌和枯草芽孢杆菌两种兼性厌氧微生物组合发酵菜籽粕工艺,结果表明,在德氏乳杆菌与枯草芽孢杆菌菌种体积比2:1、麸皮含量16%、料水质量体积比1:1.5、发酵温度36℃、发酵时间72 h条件下,菜籽粕中硫苷含量从64.558 μmol/g降低到3.473 μmol/g,硫苷降解率达94.62%。硫苷的高效降解可能是由于德氏乳杆菌和枯草芽孢杆菌协同发酵分泌多种酶,可以有效利用碳水化合物,同时提高硫苷降解率。陈小连等<sup>[49]</sup>研究表明,利用嗜酸乳杆菌、枯草芽孢杆菌和酿酒酵母混合发酵菜籽粕,可以有效降低菜籽粕中粗纤维、中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维含量,并增加天冬氨酸、谷氨酸、精氨酸等14种游离氨基酸含量,菜籽粕中营养因子的改变有利于动物胃肠道对蛋白质、氨基酸的消化吸收。枯草芽孢杆菌可利用蛋白质、多种糖及淀粉,广泛分布在土壤及腐败的有机物中,是α-淀粉酶和中性蛋白酶的重要生产菌。枯草芽孢杆菌与黑曲霉、米曲霉混合发酵菜籽粕可提高菜籽粕中粗蛋白质含量,降低中性洗涤纤维含量<sup>[65]</sup>。此外,Hu等<sup>[66]</sup>利用枯草芽孢杆菌、产朊假丝酵母、粪肠球菌混合发酵菜籽粕,硫苷、异硫氰酸酯含量分别降低了96.20%、83.13%,乳酸菌数量增加至108.93 CFU/g,乳酸菌可发酵底物中的糖类物质产生乳酸,降低菜籽粕pH,改善适口性,提高胃蛋白酶和胰蛋白酶的活性,促使肠道吸收小肽等营养物质。黑曲霉和酿酒酵母混合发酵菜籽饼也可用于制备饲用蛋白<sup>[67]</sup>,在接种量5%:5%、料液比0.8:1、饼麸质量比7:3、发酵温度30℃条件下,菜籽饼中粗蛋白质含量提高65.69%,硫苷、异硫氰酸酯含量分别降低至9.01 μmol/g、2.26 mg/g,经发酵后菜籽饼中除粗脂肪外其余指标均达到国家饲料用菜籽粕一级标准(GB/T 23736—2009)。徐鑫等<sup>[68]</sup>采用正交试验探究混菌固态发酵的最优组合,得出当蜡芽孢杆菌和植物乳杆菌接种量10%:9%、料水比1:1、麸饼质量比1:10时,混菌固态发酵可有效降低抗营养因子异硫氰酸酯和噁唑烷硫酮的含量,改善菜籽饼的品质。

在混菌发酵菜籽饼粕的过程中,不同菌株分泌不同种类的酶,同时产生不同的代谢产物,使得混菌发酵对菜籽饼粕中营养特性的改良优于单菌发酵。然而,在微生物发酵过程中并非菌株数量或接种量

越多越好。陈娟等<sup>[69]</sup>发现,采用5种菌株和6种菌株混合发酵菜籽粕,与4种菌株混合发酵相比,菜籽粕粗蛋白质含量、植酸降解率、纤维素降解率均存在不同程度的降低。出现这种现象的主要原因在于不同菌株存在生长竞争需求,从而产生拮抗作用,其次菌株生长和产生的代谢产物积累在底物中,造成菜籽粕底物发黏结块,透气性降低,产酶量减少。而蒋边等<sup>[57]</sup>发现2种菌株和3种菌株混合发酵菜籽粕,产物得率相差不大。不同菌株混合发酵对发酵条件要求不同,因此针对微生物复合协同发酵改善菜籽饼粕营养特性的研究,需在混合发酵前充分了解菌株的生长特性,如最适生长温度、是否厌氧等条件,并结合发酵目的选取不同菌株,还需结合点种对峙实验和正交优化实验确定不同菌株的最优组合和最佳工艺参数。

### 2.1.3 菌酶协同发酵

绝大部分酶的本质是蛋白质,可直接添加到饲料原料中降低抗营养因子含量,也可在发酵过程中作为特殊的催化剂优化发酵工艺。生物脱毒制备植物蛋白饲料大多以单菌或混菌配伍进行,而以菌种加酶制剂协同发酵可弥补微生物处理菜籽饼粕发酵底物利用率低、产酶量不足、营养物质不易消化吸收的缺陷,更加高效地制备高蛋白产品。

帖余等<sup>[70]</sup>采用菌酶协同处理菜籽粕,结果表明,菜籽粕中小肽含量为21.19%,与对照组相比提高了673.36%。叶国栋等<sup>[71]</sup>以碱性蛋白酶与黑曲霉、米曲霉、酿酒酵母、枯草芽孢杆菌4种菌株协同发酵菜籽粕,得出在菌株组合为枯草芽孢杆菌、黑曲霉、米曲霉(体积比1:1:1),菌酶体积比1:1时,菜籽多肽抗氧化能力最强。果胶酶可降解细胞中的果胶,促进纤维素酶降解纤维素和半纤维素为还原糖,葡聚糖酶可降解细胞壁中纤维素低结晶度区域的糖链,产生中间产物纤维二糖。赵娜等<sup>[72]</sup>利用中性蛋白酶、果胶酶、 $\beta$ -葡聚糖酶、木聚糖酶、纤维素酶、甘露糖聚酶6种酶以及枯草芽孢杆菌和植物乳杆菌2种益生菌协同发酵降解菜籽粕中的抗营养因子,最终异硫氰酸酯、噁唑烷硫酮、粗纤维含量分别下降60.85%、45.86%、32.17% ( $p < 0.05$ ),无机磷和酸溶性蛋白质含量显著增加 ( $p < 0.05$ ),有效地改善了菜籽粕饲用品质。有研究表明,乳杆菌结合纤维素酶共同发酵菜籽粕,硫苷和粗纤维含量分别下降72.04  $\mu\text{mol/g}$  和55.80%<sup>[73]</sup>。

菌酶协同发酵能够针对菜籽饼粕中的抗营养因子组成特点,通过灵活组配不同酶和菌株,从而达到更加高效降解抗营养因子、改善菜籽饼粕营养成分

的目的。

## 2.2 发酵工艺

### 2.2.1 液态发酵和固态发酵

按照微生物发酵底物的形态,发酵过程可分为液态发酵和固态发酵。液态发酵是底物与水以一定的料水比混合后添加微生物的发酵工艺,液态发酵具有耗时短、发酵产物浓度高、发酵均匀、可进行大规模集约化生产等优势。Rakariyatham等<sup>[74]</sup>用曲霉NR-4201液态发酵菜籽粕,发现发酵32h硫苷完全降解,而相同培养条件下,固态发酵需要48h才能完全降解。王晓东等<sup>[75]</sup>应用黑曲霉液态发酵时发现,在pH和发酵温度持续升高的条件下,发酵液中植酸酶和单宁酶的活力存在先上升后下降的趋势,当pH为5、发酵温度为30℃时,黑曲霉产植酸酶和单宁酶的活力达到最大。鞠兴荣等<sup>[76]</sup>选用枯草芽孢杆菌10160液态发酵菜籽粕,得到了得率为25%的血管紧张素转化酶(Angiotensin-1-convert enzyme, ACE)抑制活性较高的小分子短肽,其对ACE抑制活性为70.95%。

固态发酵是在含微量游离水的固体培养基上利用微生物发酵生产目标产品的过程。与液态发酵相比,固态发酵具有操作技术简单、投资少、能耗低、发酵过程粗放、废水处理量少、环境污染低、后期加工处理方便等优点。当前,国内传统菜籽饼粕发酵技术多采用固态发酵。基质含水量低,发酵终产物浓度高度浓缩,是生产企业选择固态发酵最重要的原因<sup>[77]</sup>。目前,在工业发酵中,固态发酵还可用于生产酶、抗生素<sup>[78]</sup>以及功能性脂肪酸等物质,如利用高山被孢霉MUM 9412固态发酵菜籽饼富集 $\omega$ -3多不饱和脂肪酸<sup>[79]</sup>。

### 2.2.2 一步发酵和分步发酵

一步发酵通常是指将一定量的发酵底物和微生物菌株一次性添加至反应器中,无须在后续发酵过程中添加菌株,经过一次发酵,即可达到发酵目的的方法,属于直接法。分步发酵过程中,第一步微生物先作用于初培养基中的发酵底物,将底物中大分子有机物质分解为小分子物质,随后第二步加入的微生物吸收第一步微生物作用后的小分子物质加快生长代谢,分泌多种酶,与第一步微生物共同作用于发酵底物,最大限度地脱除抗营养因子,改善菜籽饼品质。

微生物发酵菜籽饼粕能有效脱除抗营养因子,提高蛋白质含量,其中分步发酵对菜籽饼粕中营养特性的改良优于一步发酵。为检验分步发酵对菜籽

饼粕发酵效果的影响,方洁等<sup>[50]</sup>将模糊综合评判模型结合数学理论用于评价菜籽粕发酵脱毒效果等级,其先以黑曲霉和啤酒酵母(菌种体积比1:1)有氧发酵2 d后,再接种枯草芽孢杆菌和保加利亚乳杆菌(菌种体积比1:1)同温度发酵2 d,其中硫苷、异硫氰酸酯、植酸、芥子碱的降解率分别为76.87%、78.57%、82.58%、68.00%。在模糊综合评判模型中二次发酵抗营养因子含量等级为I级,综合评价效果最好,单菌及混菌一次发酵仅为II级。帖余等<sup>[10]</sup>通过将自筛菌株乳杆菌与黑曲霉复配再结合两步法发酵菜籽粕,结果表明菜籽粕的营养价值得到显著改善,其中总酸含量提高640.54%,酸溶性蛋白质含量提高564.81%,硫苷降解率为45.21%。

### 3 总结与展望

菜籽饼粕的脱毒是一个复杂的过程,利用微生物发酵脱毒干物质损失少、成本低、见效快、无污染。微生物发酵技术可显著降低菜籽饼粕中的抗营养因子,提高饲用价值,具有广阔的应用空间。为进一步解决我国饲用植物蛋白资源匮乏,提高菜籽饼粕综合利用率,做出如下展望。

(1)加强宣传推广。加大双低菜籽饼粕的宣传推广力度,从源头减少抗营养因子含量。尽管在20世纪80年代我国已进行低硫苷、低芥酸的双低油菜籽的育种,但传统种植和分散性小规模农业使得部分地区仍沿用留种习惯,严重阻碍了双低油菜籽的推广。

(2)选育性能优越的菌株。目前实验菌株多为工业生产保藏菌株,在自然界中存在大量原生态菌株,应进一步筛选用于发酵菜籽饼粕的高效菌株,如结合代谢工程和合成生物学技术提升菌株发酵性能,有目的地设计能够高效降解菜籽饼粕中抗营养因子的同时改善菜籽饼粕饲用价值的特异性工程菌株。

(3)优化发酵工艺。当前发酵工艺多采用传统方法,而且多注重于菌株和发酵过程参数的优化,今后可针对菜籽饼粕的特点简化发酵工艺,采用先进的生物反应系统优化发酵参数,同时监测菜籽饼粕抗营养因子的降解和营养物质的生产,开发高值化菜籽饼粕副产品,从而缓和植物蛋白资源匮乏的问题。

(4)多种技术联用。单一的脱毒方法很难全面脱除抗营养因子,今后可将物理脱毒、化学脱毒、微生物发酵脱毒、酶法脱毒等多种技术联用,不断更新菜籽饼粕的脱毒技术。

(5)规范行业发展。目前关于菜籽饼粕发酵后

的感官指标、卫生指标和营养指标综合的研究比较欠缺。今后应在微生物发酵菜籽饼粕研究过程中对发酵产品品质建立相应的评判标准,以便更好地推动发酵菜籽饼粕行业的健康快速发展。

### 参考文献:

- [1] 何微,李俊,王晓梅,等.全球油菜产业现状与我国油菜产业问题、对策[J].中国油脂,2022,47(2):1-7.
- [2] 董颖超,杨洁,王昊,等.膨化过程中水分含量对菜籽粕蛋白性能的影响[J].饲料工业,2019,40(18):24-29.
- [3] DAS PURKAYASTHA M, GOGOI J, KALITA D, et al. Physicochemical and functional properties of rapeseed protein isolate; Influence of antinutrient removal with acidified organic solvents from rapeseed meal[J]. J Agric Food Chem, 2014, 62(31): 7903-7914.
- [4] KOZŁOWSKI K, JEROCH H. Enhancing the nutritional value of poultry feedstuffs using the example of rapeseed products: A review[J]. Ann Anim Sci, 2014, 14(2): 245-256.
- [5] HAO Y N, WANG Z G, ZOU Y C, et al. Effect of static - state fermentation on volatile composition in rapeseed meal[J]. J Sci Food Agric, 2020, 100(5): 2145-2152.
- [6] 杜静,钮琰星,周琦,等.固相微萃取条件优化及发酵菜粕风味物质分析[J].中国粮油学报,2017,32(7):114-120.
- [7] LI Z, LI Y, LV Z, et al. Net energy of corn, soybean meal and rapeseed meal in growing pigs [J/OL]. J Anim Sci Biotechnol, 2017, 8: 44[2023-06-07]. <https://doi.org/10.1186/s40104-017-0169-1>.
- [8] CHENG H, LIU X, XIAO Q, et al. Rapeseed meal and its application in pig diet: A review [J/OL]. Agriculture, 2022, 12(6): 849[2023-06-07]. <https://doi.org/10.3390/agriculture12060849>.
- [9] 王明洁,李进一,何荣,等.菜籽饼固态发酵生产蛋白饲料的研究[J].粮食与食品工业,2017,24(6):78-84.
- [10] 帖余,肖宇婷,刘军,等.高产酸菌株的筛选、鉴定及其混菌发酵对菜籽粕营养价值的影响[J].食品工业科技,2020,41(10):146-150.
- [11] CHEN W, LI X, MA X, et al. Simultaneous hydrolysis with lipase and fermentation of rapeseed cake for iturin A production by *Bacillus amyloliquefaciens* CX-20[J/OL]. BMC Biotechnol, 2019, 19(1): 98[2023-06-07]. <https://doi.org/10.1186/s12896-019-0591-x>.
- [12] 周守叙.菜籽饼粕的营养价值与毒性分析[J].广东饲料,2012,21(2):30-32.
- [13] 王利国,徐宝刚.菜籽饼粕中抗营养因子的危害与消除[J].畜牧兽医科技信息,2017(7):132.
- [14] WILKE V, GICKEL J, VISSCHER C. Monitoring of performance - based environmental impacts of substituting

- soybean meal with rapeseed meal in the rye – based diet of weaned pigs[J/OL]. Sustainability, 2023, 15(3): 2210 [2023 – 06 – 07]. <https://doi.org/10.3390/su15032210>.
- [15] AIDER M, BARBANA C. Canola proteins: Composition, extraction, functional properties, bioactivity, applications as a food ingredient and allergenicity: A practical and critical review[J]. Trends Food Sci Technol, 2011, 22(1): 21 – 39.
- [16] 翟晓娜, 师建芳, 赵慧凝, 等. 菜籽饼粕蛋白的提取、功能特性及其在食品中应用的研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(12): 389 – 397.
- [17] SHI C, HE J, YU J, et al. Physicochemical properties analysis and secretome of *Aspergillus niger* in fermented rapeseed meal [J/OL]. PLoS One, 2016, 11(4): e0153230 [2023 – 06 – 07]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0153230>.
- [18] 王志高. 菜籽蛋白基纳米载体的构建及其生物学效价研究[D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2019.
- [19] 嵇乐乐. 益生菌混合发酵菜籽粕饲料的研究[D]. 江苏 淮安: 淮阴工学院, 2020.
- [20] 金虎, 李坤朋, 黄凤洪, 等. 菜籽饼粕生物转化与高值化利用技术研究进展[J]. 中国油料作物学报, 2014, 36(4): 545 – 550.
- [21] NIU Y, JIANG M, GUO M, et al. Characterization of the factors that influence sinapine concentration in rapeseed meal during fermentation [J/OL]. PLoS One, 2015, 10(1): e0116470 [2023 – 06 – 07]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0116470>.
- [22] KHAJALI F, SLOMINSKI B A. Factors that affect the nutritive value of canola meal for poultry[J]. Poult Sci, 2012, 91(10): 2564 – 2575.
- [23] 饲料卫生标准: GB 13078—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [24] XIE C, LI W, GAO R, et al. Determination of glucosinolates in rapeseed meal and their degradation by myrosinase from rapeseed sprouts [J/OL]. Food Chem, 2022, 382: 132316 [2023 – 06 – 07]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132316>.
- [25] ALMUSHAYTI A Y, BRANDT K, CARROLL M A, et al. Current analytical methods for determination of glucosinolates in vegetables and human tissues[J/OL]. J Chromatogr A, 2021, 1643: 462060 [2023 – 06 – 07]. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2021.462060>.
- [26] GRUBB C D, ABEL S. Glucosinolate metabolism and its control[J]. Trends Plant Sci, 2006, 11(2): 89 – 100.
- [27] NARBAD A, ROSSITER J T. Gut glucosinolate metabolism and isothiocyanate production[J/OL]. Mol Nutr Food Res, 2018, 62(18): e1700991 [2023 – 06 – 07]. <https://doi.org/10.1002/mnfr.201700991>.
- [28] VON DANWITZ A, SCHULZ C. Effects of dietary rapeseed glucosinolates, sinapic acid and phytic acid on feed intake, growth performance and fish health in turbot (*Psetta maxima* L.) [J/OL]. Aquaculture, 2020, 516: 734624 [2023 – 06 – 07]. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734624>.
- [29] TRIPATHI M K, MISHRA A S. Glucosinolates in animal nutrition: A review[J]. Anim Feed Sci Technol, 2007, 132(1/2): 1 – 27.
- [30] BARBA F J, NIKMARAM N, ROOHINEJAD S, et al. Bioavailability of glucosinolates and their breakdown products: Impact of processing [J/OL]. Front Nutr, 2016, 3: 24 [2023 – 06 – 07]. <https://doi.org/10.3389/fnut.2016.00024>.
- [31] 潘雷, 李爱科, 吴莹莹, 等. 菜籽饼粕中硫甙及其降解物分析中存在的问题[J]. 中国油脂, 2010, 35(3): 23 – 27.
- [32] ZHANG Y, LV H, YANG B, et al. Characterization of thermally induced flavor compounds from the glucosinolate progoitrin in different matrices via GC – TOF – MS[J]. J Agric Food Chem, 2022, 70(4): 1232 – 1240.
- [33] GILANI G S, COCKELL K A, SEPEHR E. Effects of antinutritional factors on protein digestibility and amino acid availability in foods[J]. J AOAC Int, 2005, 88(3): 967 – 987.
- [34] 刘平, 孙林, 曾作财, 等. 菜籽粕中单宁的固态发酵降解和条件优化[J]. 饲料研究, 2018(4): 70 – 75.
- [35] 刘杨, 袁廷香, 娄波. 单宁酸测定方法研究进展[J]. 赤峰学院学报(自然科学版), 2017, 33(14): 1 – 3.
- [36] 杨露, 谭会泽, 刘松柏, 等. 饲料原料中植酸的研究进展[J]. 粮食与饲料工业, 2019(3): 53 – 57.
- [37] EL – BATAL A I, ABDEL KAREM H. Phytase production and phytic acid reduction in rapeseed meal by *Aspergillus niger* during solid state fermentation [J]. Food Res Int, 2001, 34(8): 715 – 720.
- [38] SHI C, HE J, YU J, et al. Solid state fermentation of rapeseed cake with *Aspergillus niger* for degrading glucosinolates and upgrading nutritional value [J/OL]. J Anim Sci Biotechnol, 2015, 6(1): 13 [2023 – 06 – 07]. <https://doi.org/10.1186/s40104-015-0015-2>.
- [39] SHI C, HE J, WANG J, 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.
- [40] 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.



- [41] VIG A P, 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.
- [42] 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.
- [43] 周晓容, 孙佩佩, 刘志云, 等. 发酵菜籽粕在生长育肥猪上的营养价值评定 [J]. *畜牧兽医学报*, 2020, 51(3): 524–533.
- [44] ZHANG Z, WEN M, CHANG Y. Degradation of glucosinolates in rapeseed meal by *Lactobacillus delbrueckii* and *Bacillus subtilis* [J]. *Grain Oil Sci Technol*, 2020, 3(2): 70–76.
- [45] 管维, 兰时乐, 詹逸舒, 等. 复合微生物固态发酵菜籽饼粕对抗营养因子去除条件的研究 [J]. *安徽农业科学*, 2020, 48(2): 189–191, 196.
- [46] WU Z, CHEN J, AHMED PIRZADO S, et al. The effect of fermented and raw rapeseed meal on the growth performance, immune status and intestinal morphology of broiler chickens [J]. *J Anim Physiol Anim Nutr*, 2022, 106(2): 296–307.
- [47] 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/OL]. *LWT – Food Sci Technol*, 2019, 112: 108238 [2023–06–07]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.06.005>.
- [48] WANG X, JIN Q, 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.
- [49] 陈小连, 占今舜, 黄江南, 等. 发酵菜籽粕对28~49日龄白羽公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.
- [50] 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.
- [51] LIU F, CHEN Z, SHAO 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.
- [52] 尹乐斌, 李乐乐, 何平, 等. 枯草芽孢杆菌发酵豆渣制备多肽及其活性研究 [J]. *中国酿造*, 2022, 41(1): 75–79.
- [53] ADAV S S, LI A A, MANAVALAN A, et al. Quantitative iTRAQ secretome analysis of *Aspergillus niger* reveals novel hydrolytic enzymes [J]. *J Proteome Res*, 2010, 9(8): 3932–3940.
- [54] SRIVASTAVA A, KAR R. Application of immobilized tannase from *Aspergillus niger* for the removal of tannin from myrobalan juice [J]. *Indian J Microbiol*, 2010, 50 (Suppl 1): 46–51.
- [55] 张佳欣. CRISPR/Cas9 技术在里氏木霉纤维素酶系改良和异源蛋白表达分泌中的应用 [D]. 济南: 山东大学, 2022.
- [56] 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.
- [57] 蒋边, 潘进权, 谢瑞敏, 等. 固态发酵菜籽粕生产多肽及降解硫苷菌种的筛选 [J]. *食品工业科技*, 2015, 36(24): 164–168.
- [58] 孙林, 刘平, 陈金和, 等. 菌种和发酵条件对菜籽粕中植酸和单宁的影响 [J]. *养猪*, 2017(5): 9–12.
- [59] 乔家运, 陈龙宾, 李平, 等. 植物单宁的生物降解研究进展 [J]. *饲料研究*, 2010(11): 11–13.
- [60] 何小丽, 李冲, 张妮娅, 等. 生物发酵法改善菜粕品质的研究 [J]. *中国粮油学报*, 2016, 31(11): 85–91.
- [61] 吴正可, 刘国华, 蔡辉益, 等. 硫甙脱毒菌株的筛选及其发酵菜籽粕的效果 [J]. *动物营养学报*, 2018, 30(1): 313–320.
- [62] 邱良伟, 顾拥建, 沙文锋, 等. 复合微生物固态发酵菜籽粕的研究 [J]. *安徽农业科学*, 2015, 43(3): 209–211.
- [63] 李莉娜, 张林鑫, 张凯凯, 等. 菜籽粕固体发酵及其理化性质的研究 [J]. *饲料工业*, 2019, 40(13): 43–48.
- [64] QUINTANA G, SIMÕES M G, HUGO A, et al. Layer-by-layer encapsulation of *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *Bulgaricus* using block-copolymers of poly(acrylic acid) and pluronic for safe release in gastro-intestinal conditions [J]. *J Funct Foods*, 2017, 35: 408–417.
- [65] 涂瑞, 曾钰, 彭忠利, 等. 复合菌固态发酵对杂粕营养价值的影响 [J]. *中国饲料*, 2021(3): 126–131.
- [66] HU Y, WANG Y, LI A, 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.
- [67] 程杰顺, 吴学风. 菜籽饼发酵制备饲用蛋白的研究 [J]. *农产品加工*, 2015(23): 18–21.
- [68] 徐鑫, 李吕木, 吴东. 菜籽饼硫苷降解菌株筛选、鉴定及其发酵条件优化 [J]. *中国油脂*, 2015, 40(11): 22–27.
- [69] 陈娟, 刘军, 张云鹏, 等. 微生物降解菜籽粕中抗营养因子的研究 [J]. *粮食与饲料工业*, 2010(7): 40–42.

### 3 结论

本文选取地塞米松作为阳性对照,采用油茶籽油与高油酸葵花籽油对体外皮肤模型进行抗炎、抗刺激、抗湿疹功效研究,初步得出以下结论:高油酸葵花籽油与油茶籽油对炎症引起的瘙痒、特异性皮炎、湿疹等均有一定抑制和缓解作用,同时油茶籽油对炎症引起的损伤也有一定抑制和缓解作用。本研究为油茶籽油与高油酸葵花籽油在化妆品中的应用提供了数据支撑,进一步扩大了油茶籽油与高油酸葵花籽油的应用范围。

#### 参考文献:

- [1] 程恒光,郭春景,董全喜. 高油酸葵花籽油与油茶籽油脂肪酸组成、营养成分及氧化稳定性比较[J]. 中国油脂, 2021, 46(12): 123-126.
- [2] 兰念念,刘睿杰,常明,等. 油茶籽油的抗炎活性研究[J]. 中国油脂, 2018, 43(8): 84-88.
- [3] 姚小华,朱亚新. 山茶籽油的功效及应用[J]. 香料香精化妆品, 2018(5): 74-78.
- [4] 马力,陈永忠. 茶油的功能特性分析[J]. 中国农学通报, 2009, 25(8): 82-84.
- [5] 孙梦瑶,曹清明,裴小芳,等. 油茶籽油药理及产品开发生的研究进展[J]. 农产品加工, 2021(16): 63-68.
- [6] 胡超,杨陈,黄凤洪. 葵花籽活性成分及生理功能研究进展[J]. 中国食物与营养, 2017, 23(10): 58-62.
- [7] 高莹,鲁楠,职蕾蕾,等. 婴幼儿皮肤结构和生理特征的研究进展[J]. 中国美容医学, 2015, 24(3): 77-80.
- [8] 李潇,张晓娥,卢永波,等. 化妆品功效评价(VIII): 3D皮肤模型在化妆品功效评价中的应用[J]. 日用化学工业, 2018, 48(9): 489-494, 510.
- [9] 陈来成,万洁,杨荣鑫,等. Epikutis 模型替代法研究大麻叶提取物的抗炎修复功效[J]. 日用化学品科学, 2020, 43(11): 12-15, 22.
- [10] MONTERO P, MILARA J, PÉREZ - LEAL M, et al. Paclitaxel - induced epidermal alterations; An *in vitro* preclinical assessment in primary keratinocytes and in a 3D epidermis model [J/OL]. *Int J Mol Sci*, 2022, 23(3): 1142 [2023-06-16]. <https://doi.org/10.3390/ijms23031142>.
- [11] 李文昭,蒋晴,唐礼荣. 含山茶油保湿乳抗湿疹、抗炎症的体外研究[J]. 香料香精化妆品, 2022(5): 113-117, 129.
- [12] 周春蕾,顾军. 白介素-1和银屑病[J]. 临床皮肤科杂志, 2003, 32(6): 365-367.
- [13] 贾淑青,方锐华. 姜黄素对小鼠寻常型银屑病模型 TNF- $\alpha$ 、IL-6 和 IL-8 表达的影响[J]. 皮肤病与性病, 2017, 39(4): 235-237.
- [14] 柯美玲,余维华,蔡涛,等. Periostin/TSLP 在慢性瘙痒患者皮肤组织中的表达研究[J]. 重庆医科大学学报, 2018(18): 1116-1120.
- [15] 李伟源. 湿疹患者血清中 TSLP、IL-10 的检测及其临床相关性研究[D]. 石家庄: 河北医科大学, 2016.
- (上接第 65 页)
- [70] 帖余,李丽,刘军,等. 菌酶协同处理对发酵菜粕的影响[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(17): 117-122.
- [71] 叶国栋,潘婉莲,柯婉,等. 菌酶协同下的低温压榨菜籽粕抗氧化肽制备工艺研究[J]. 食品工业科技, 2018, 39(2): 134-140.
- [72] 赵娜,魏金涛,李绍章,等. 酶解发酵工艺对菜籽粕饲用品质的影响[J]. 饲料研究, 2014(21): 83-85.
- [73] 朱晓峰. 纤维降解酶与乳酸杆菌协同发酵改善菜籽粕营养价值研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2020.
- [74] RAKARIYATHAM N, SAKORN P. Biodegradation of glucosinolates in brown mustard seed meal (*Brassica juncea*) by *Aspergillus* sp. NR-4201 in liquid and solid-state cultures [J]. *Biodegradation*, 2002, 13(6): 395-399.
- [75] 王晓东,胡海滨,麦康森,等. 土壤中单宁和植酸降解菌的筛选、鉴定及液态发酵研究[J]. 水产学报, 2016, 40(10): 1634-1642.
- [76] 鞠兴荣,金晶,王立峰,等. 液态发酵法制备菜籽 ACE 抑制肽发酵条件优化[J]. 中国粮油学报, 2011, 26(1): 96-101.
- [77] COUTO S R, SANROMÁN M Á. Application of solid-state fermentation to food industry: A review [J]. *J Food Eng*, 2006, 76(3): 291-302.
- [78] LIZARDI - JIMÉNEZ M A, HERNÁNDEZ - MARTÍNEZ R. Solid state fermentation (SSF): Diversity of applications to valorize waste and biomass [J/OL]. *3 Biotech*, 2017, 7(1): 44 [2023-06-07]. <https://doi.org/10.1007/s13205-017-0692-y>.
- [79] FERREIRA M, FERNANDES H, PERES H, et al. Bio-enrichment of oilseed cakes by *Mortierella alpina* under solid-state fermentation [J/OL]. *LWT - Food Sci Technol*, 2020, 134: 109981 [2023-06-07]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109981>.