

菜籽饼粕生物转化与高值化利用技术研究进展

金 虎¹, 李坤朋¹, 黄凤洪^{1,2*}, 钮琰星¹, 郭 勉¹, 向 霞¹, 胡传炯¹, 万 霞¹, 龚阳敏¹

(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: 菜籽饼粕是一种利用价值很高的优质植物蛋白资源。由于饼粕中存在硫甙、芥酸、植酸等多种有害成分和抗营养因子, 其利用价值和应用范围受到极大限制。生物技术法对于改善饼粕饲用品质、提升综合利用价值、拓宽应用领域等方面具有独特的优势。本文重点介绍了生物技术法在饼粕脱毒、饲用品质改良、发酵生产食用菌和酶制剂等产品的生物转化与高值化利用方面的最新研究进展, 并概述了生物技术法应用于饼粕的发展方向。

关键词: 菜籽饼粕; 发酵; 脱毒; 生物转化

中图分类号: S816, Q93 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9084(2014)04-0545-06

Progress in bioconversion and high-value utilization of rapeseed meal

JIN Hu¹, LI Kun-peng¹, HUANG Feng-hong^{1,2*}, NIU Yan-xing¹,
GUO Mian¹, XIANG Xia¹, HU Chuan-jiong¹, WAN Xia¹, GONG Yang-min¹

(1. Oil Crops Research Institute of Chinese Academy of Agriculture Sciences, Wuhan 430062, China;

2. Hubei Key Laboratory of Lipid Chemistry and Nutrition, Wuhan 430062, China)

Abstract: Rapeseed meal is an excellent plant protein resource with high utilization value. However, its application has been hampered by the toxic and anti-nutritional components such as glucosinolates, erucic acid and phytic acid. Biotechnological methods have particular advantages in improving meal forage quality, promoting the comprehensive utilization value and exploiting the application area of rapeseed meal. The present review summarized the latest development of biotechnological methods on detoxification of meal, forage quality improvement, bioconversion and high-value application of rapeseed meal for the production of edible mushroom and enzymes, etc. The possible developing trend in rapeseed meal application was proposed.

Key words: Rapeseed meal; Fermentation; Detoxification; Bioconversion

油菜籽是我国主要油料作物之一, 年产量超过 1 100 万吨。菜籽榨油后约有 700 多万吨菜籽饼粕。菜籽饼粕中粗蛋白含量一般在 35% ~ 45%, 作为一种优质的植物蛋白源, 菜籽饼粕具有良好的应用潜能。然而, 饼粕中存在硫苷、芥酸、植酸和多酚等多种有害或抗营养成分, 极大限制了其作为蛋白源在饲料中的有效应用。使得大量的饼粕只能按少量比例添加到动物饲料中或直接用作低值有机肥料, 造成了优质蛋白资源的浪费。为了充分利用菜籽饼粕这一优质低价植物蛋白质资源, 提高菜籽饼粕的利用价值, 国内外研究主要集中在如下三个方面: (1) 饼粕饲用品质改良, 通过油菜遗传选育、加工工艺改

进^[1]和饼粕脱毒等方式提高饼粕的饲用品质; (2) 饼粕综合利用, 在制取饲用浓缩蛋白的同时提取分离多糖、植酸和多酚等高附加值产品; (3) 饼粕生物转化, 通过微生物发酵作用, 以饼粕为发酵原料生产酶制剂、有机酸和抗生素等生物活性产品。

随着菜籽原料品质和加工技术的提升与改进, 人们对菜籽饼粕用于动物饲料的偏见正逐渐消除。近年来, 国内外研究者也加大了对菜籽饼粕脱毒及品质改良的研发力度, 饼粕在饲料中的添加量也逐渐增加。尽管如此, 目前菜粕作为饲用蛋白直接添加到饲料中效果仍不太理想, 寻求并开发出用于饲用蛋白以外的菜粕生物利用新途径正成为近年来国

收稿日期: 2014-01-16

基金项目: 国家自然科学基金(31201461); 国家 863 计划(2011AA100904); 国家支撑计划(2012BAD49G00)

作者简介: 金 虎(1980-), 男, 湖北汉川人, 博士, 主要从事油料饼粕生物转化和高值化利用研究

* 通讯作者: 黄凤洪(1965-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事油料加工研究, E-mail: jiagongzx@oilcrops.cn

内外关注的焦点^[2]。生物技术法在菜籽饼粕品质改良和高值化转化利用上具有独特的优势,受到越来越广泛的重视和应用。以下重点介绍了生物技术在菜粕饲用生物脱毒、饲用品质改良以及生物转化生产高附加值产品(酶制剂、抗生素等)等方面的研究进展。

1 菜籽饼粕营养成分和抗营养因子

1.1 菜籽饼粕主要营养成分

菜粕主要成分为粗蛋白质、碳水化合物、粗灰分、粗脂肪和水分(表1),碳、氢、氧和氮四种主要元素的含量分别为46.9%、6.3%、6.4%和32.2%^[3]。菜粕中的主要营养成分为蛋白质、碳水化合物、矿物质和维生素。其中,蛋白质含量高达35%以上,而且富含动物所必需的赖氨酸、色氨酸、蛋氨酸和胱氨酸等营养成分^[4],含硫氨基酸(蛋氨酸和胱氨酸)达1.23%,是一种良好的含硫氨基酸资源。菜籽饼粕中含有20%~25%碳水化合物,其中2%~4%的单糖、二糖和非纤维多糖^[5]可以被直接吸收利用。菜粕中含有1%~3%的粗脂肪,可以作为能量补充提高饲料能量。此外,菜籽饼粕中含有丰富的矿物质和微量元素^[3],其中钙、硒、铁、镁、锰、锌的含量比豆粕高,磷的含量约是豆粕的2倍。

表1 菜粕主要物质组成

Table 1 Main matter composition of rapeseed meal

成分 Component	平均含量 Average content/%
粗蛋白 Crude protein	35~40
碳水化合物 Carbohydrate	20~25
粗灰分 Crude ash	5~8
粗脂肪 Crude lipids	1~3
水分 Moisture	11~12

综合分析菜粕的营养价值:一方面,菜粕不仅蛋白质含量高,而且氨基酸组成平衡,可作为优质低价的植物蛋白源用作动物饲料;另一方面,从微生物营养需求的角度,菜粕中含有微生物生长所需的氮源(蛋白质)、碳源和能源(碳水化合物)及矿物质和维生素,也是一种潜在的微生物发酵原料^[6]。

1.2 菜籽饼粕中主要抗营养因子

菜籽粕中含有硫甙、单宁、植酸和芥子碱等抗营养因子。硫甙本身无毒,但在芥子酶的作用下很容易分解成毒性物质异硫氰酸酯、恶唑烷硫酮和腈类^[7]。这些毒性物质的存在会严重影响饲料的适口性,降低动物对营养物质的利用率,引起单胃动物甲状腺肿大甚至会造成动物死亡。单宁在菜粕中的含量为1.5%~3.0%,可抑制消化酶的活性而降低蛋白质的利用率,使其代谢能力低下,同时也会降低

饲料的适口性并抑制动物生长。植酸在菜粕中的含量为3%~6%,是一种很强的金属螯合剂,可降低矿物质、蛋白质、淀粉和脂质的消化利用率和单胃动物对磷的利用率。芥子碱是芥酸的胆碱脂,在菜粕中的含量为0.6%~0.8%,是使菜粕产生苦味的主要原因之一,同时也会影响饲料的适口性、降低菜粕中蛋白的营养价值^[8]。

2 菜籽饼粕生物技术脱毒和品质改良

为了降低饼粕中抗营养物质的含量,国内外开展了大量物理或化学脱毒方法的研究。但是,简单的物理或者化学脱毒方法存在脱毒范围小、脱毒率低、对饼粕中营养物质破坏大、脱毒后的菜粕适口性差、不易工业放大等一系列问题,难以达到理想的脱毒效果^[9]。生物技术脱毒是近年来研究较多的一种有效的菜粕脱毒方法,主要包括遗传育种脱毒、酶催化水解脱毒和微生物发酵脱毒。

2.1 遗传育种脱毒

油菜生物遗传育种能够从源头上降低菜粕中毒性物质和抗营养因子含量,也使菜粕中蛋白质含量以及氨基酸组成得到改善。1974年,加拿大曼尼托巴大学科学家保德·斯蒂芬森博士通过复合杂交育成了世界上第一个双低油菜品种Tower,并将具有双低品质的油菜命名为Canola(卡诺拉),其特征是油中芥酸含量低于2%,脱脂饼粕中硫甙含量低于30μmol/g。此后,世界各国也纷纷加入双低油菜的选育和推广工作中来,育成了一大批优质高产的油菜新品种。在过去几十年,Canola油菜中硫甙的含量稳步下降,如今硫甙含量只有其最初含量的十二分之一(即由120μmol/g降低至10μmol/g),使得菜粕在动物饲料中的添加量也得到很大提升^[7]。

中国开展油菜品质改良工作起步较晚,1986年我国选育出第一个双低油菜新品种豫油1号,随后又相继选育出一批双低油菜新品种。2000年全国通过审定的双低油菜品种达到90个,其中,双低杂交油菜品种29个,双低常规品种61个。2010年全国的双低油菜普及率达到90%以上^[10],商品菜籽的品质明显改善。双低油菜种植面积的提高和品质的改善将大大提升菜籽粕的饲用价值。

2.2 酶催化水解改善饼粕饲用品质

目前,商业化饲用酶(如非淀粉多糖酶、植酸酶、蛋白酶、果胶酶和脂肪酶等)在养殖业中的应用已经非常广泛。非淀粉多糖酶如纤维素酶能够破坏富含纤维素的细胞壁,释放包埋在其中的淀粉、蛋白质、矿物质等营养物质,同时部分纤维素还能被降解

为可消化吸收的还原糖,从而提高饲料的利用率。Mahajan 等^[11]研究发现,商业用酶制剂如胃蛋白酶、木瓜蛋白酶、胰蛋白酶、无花果酶和半纤维素酶等能够明显改善饼粕的功能特性。经蛋白酶处理后,菜粕蛋白颗粒大小显著降低,蛋白水解产物的功能特性也得到明显改善。经过无花果酶和半纤维素酶处理后,饼粕中毒性物质硫甙的含量显著降低,而且酚类物质和植酸等抗营养因子含量也明显减少。另外,菜粕经半纤维素酶处理后,菜粕的吸水性、吸油性和起泡能力都明显增强,并且表现出良好的乳化活性和乳化稳定性^[12]。Fang 等^[5,13]研究发现,通过向菜粕中添加木聚糖酶等非淀粉多糖酶,能够显著改善猪的饲养和消化性能。Simbaya 等^[14]考察了不同酶的添加对改善菜粕营养价值的潜能,蛋白酶能促进菜粕中蛋白的水解,碳水化合物水解酶有利于菜粕中多糖的溶解,植酸酶、碳水化合物水解酶和蛋白酶同时添加在以麸皮/菜粕的缺磷饲料中,对肉鸡的生长具有协调增效作用。Pustjens 等^[15]研究了不同预处理方法对菜粕中碳水化合物释放效果的影响,结果表明经商业化果胶酶处理后的菜粕中残留碳水化合物最低,能够明显提高菜粕的可消化性。

2.3 微生物固态发酵脱毒

微生物脱毒方法是利用微生物自身所分泌的复杂酶系,使菜籽饼粕中的毒性物质硫甙和其他抗营养因子(如植酸、单宁、纤维素等)分解并被微生物加以利用,从而提高菜籽饼粕营养成分的利用率。同时,微生物代谢过程中产生的香味物质或香味的前体物质,也提高了脱毒后菜籽饼粕的风味和适口性。目前,已报道的微生物脱毒方式以固态发酵、有氧培养和多菌种混合发酵为主,也有极少数采用厌氧固态发酵的报道。已报道的菜粕发酵主要微生物有细菌(如芽孢杆菌和乳酸菌)、酵母菌(酿酒酵母)和真菌(绿色木霉、米曲霉和黑曲霉等)。Rozan 等^[16]使用少孢根霉对菜粕进行固态发酵,发酵 40h

碳水化合物降解率为 80%,木质素和其他不可消化多酚降解率为 30%,总硫甙的降解率达 47%,同时,菜粕中残留脂肪降解率为 29%,总蛋白含量也相应增加。Vig 等^[9]的研究也进一步证实了这一研究结果,通过接种少孢根霉,硫甙、恶唑烷硫酮、植酸和粗纤维含量分别减少了 41%、34%、42% 和 25.5%。通过微生物处理之后,饼粕中蛋白质含量也有所增加。高冬余等^[17]以乳酸菌和枯草芽孢杆菌为出发菌进行混菌厌氧固态发酵菜籽粕并对发酵条件进行了优化,在最佳培养条件下发酵 15d 后,菜粕中的硫甙含量从 84μmol/g 降至 33μmol/g,粗蛋白含量较原料提高了 4.15%,物料损耗为 3.73%。Zuchowski 等^[18]利用白腐真菌云芝和侧耳分别对菜粕进行固态发酵,发酵结束时菜粕中芥酸含量分别减少了 93% 和 93.2%。Wang 等^[19]利用横梗霉、土曲霉和热带假丝酵母对菜粕进行混菌固态发酵,发酵 96h 后菜粕中粗纤维、植酸和总硫甙降解率分别为 66.2%、28.3% 和 98%,同时,发酵菜粕中蛋白含量增加 24%,菜粕的营养价值也得到极大提高。

3 菜籽饼粕生物转化和高值化利用

菜籽饼粕的主要成分是蛋白质、木质纤维素和矿物质,最初用于蛋白补充限量添加在饲料中,有时也被用作肥料或可燃物源。而且,菜粕价格便宜,很容易获得。最近,国内外研究者利用菜粕的结构和物理化学特性(富含蛋白、纤维和能量成分),以及能够支持各种微生物液态和固态发酵培养的特点,开发出了菜粕用于糖化和生产酶制剂、抗生素和其他生物产品的生物发酵过程,从而开辟了菜粕在白色生物技术应用领域的新前景^[2]。在微生物利用过程中,菜籽饼粕提供了固态发酵的基质或作为液态发酵培养基的补充物。目前,生物过程中利用菜粕作为营养物质已生产出了一系列高附加值产品(表 2)。

表 2 菜粕应用于生物过程生产高附加值产品
Table 2 Applications of rapeseed meal in bioprocesses yielding high value – added products

产品 Product	产量 Yield	发酵微生物 Microorganism	参考文献 Reference
食用菌 Edible mushrooms	71g/kg – substrate	侧耳 <i>Pleurotus ostreatus</i>	[20]
木聚糖酶 Xylanase	210 IU/mL	里氏木霉 <i>Trichoderma reesei</i>	[21]
蛋白酶 Protease	10 ⁵ U/(L · h)	链霉菌 <i>Streptomyces thermovulgaris</i>	[22]
植酸酶 Phytase	5 000U/kg – substrate	无花果曲霉 <i>Aspergillus ficuum</i>	[24]
内切 – β – 木聚糖酶 endo – β – xylanase	3.6 × 10 ⁴ U/[(1kg – substate) · h]	柔毛腐质霉 <i>Humicola lanuginosa</i>	[25]
酿酒酵母细胞 <i>Saccharomyces cerevisiae</i> cells	6.85g – dry cell/L	米曲霉 <i>Aspergillus oryzae</i>	[26]
琥珀酸 Succinic acid	23.4g/L	琥珀酸放线杆菌 <i>Actinobacillus succinogenes</i>	[27]
聚羟基脂肪酸酯 Polyhydroxyalkanoates	10.9g/L	钩虫贪铜菌 <i>Cupriavidus necator</i>	[30]

3.1 生产食用菌

菜粕中木质纤维素含量较高。木质纤维素主要由纤维素、半纤维素和木质素组成,通常情况下,木质纤维素中的木质素和纤维素相结合阻止了酶将菜粕水解成可以直接利用的糖。一般预处理方法需要对木质纤维素的结构进行修饰改进,通过去除木质素的保护作用增加纤维素的生物可利用性。相对于其他微生物而言,白腐霉能够广泛且迅速地降解木质素生产食用菌,在木质素和植物多糖的碳回收利用中发挥着重要的作用。Sarıkaya 等^[20]利用菜粕作为营养原料固态发酵生产食用菌侧耳,研究发现食用侧耳能够降解菜粕中的木质纤维素生产单细胞蛋白,而且侧耳的生长状况不仅与菜粕颗粒大小有关,还与藜芦醇、甘油或过氧化氢等诱导物的存在有关,这些诱导物能够促进侧耳对木质纤维素的降解和利用速度。另外,培养过程中湿度恒定、提高氧的供应均有利于食用菌发酵。

3.2 酶制剂

早在 19 世纪初,就有利用菜粕作为基质进行固态发酵生产各种酶制剂的报道。1990 年, Gättinger 等^[21]利用卡诺拉菜粕作为碳源,通过里氏木霉发酵生产木聚糖酶、乙酰基-木聚糖酯酶和木糖苷酶,在含有 8% (*m/V*) 卡诺拉菜粕的培养基中培养 9 ~ 12d,木聚糖酶最高活性达 210 IU/mL。1994 年, Yeoman 等^[22]测试了一系列放线菌利用基于菜粕培养基生长和生产胞外酶的能力,结果表明链霉菌具有较强的蛋白酶生产能力,表明菜粕具有较高含量的可利用蛋白。除了蛋白酶外,大部分的测试菌株能够合成胞外水解酶(如纤维素酶和木聚糖酶)。最近, Freitas 等^[23]以菜籽饼作为唯一营养基质,通过米曲霉固态发酵生产蛋白酶,并对固态发酵过程中的含水量、培养温度和接种量进行了优化,得到米曲霉利用菜粕发酵时的最佳培养条件:含水量 40%,培养温度 20℃,接种量为每克菜饼含米曲霉孢子 10^7 个,优化后蛋白酶活性是优化前的 5.8 倍。Ebun 等^[24]以菜粕为原料,证明可以通过无花果曲霉固态发酵生产植酸酶,同时降解菜粕中的植酸。进一步研究结果表明,固态发酵的培养基最佳湿度为 64%,表面活性剂如吐温-80 或油酸钠能够增加植酸酶的生产速率和植酸的水解速度。2005 年, Rajoka 等^[25]利用卡诺拉菜粕作为基质固态发酵生产内切木聚糖酶,培养 72h 后,内切木聚糖酶的回收率为 588 IU/g-基质。最近, Wang 等^[26]研究结果表明,菜粕经米曲霉固态发酵后,能够分泌产生蛋白酶、植酸酶和磷酸酶等多种水解酶,发酵后菜粕中游

离氨基氮、无机磷和葡萄糖浓度分别为 2g/L, 304mg/L 和 1.8g/L。用热水对发酵后的固体物进行处理导致真菌自溶和菌体营养物质的释放。这些物质稀释 3 倍能够提供酿酒酵母生长所需的必需营养成分(还需补充一定量的碳源),酿酒酵母的细胞干重达 6.85g/L。

3.3 有机酸、抗生素和微生物油脂

近年来,国际上很多研究者利用菜籽饼粕的营养特性,相继开发出了以低值菜粕作为发酵原料生产如抗生素和有机酸等高附加值产品的新工艺和新技术。2011 年, Chen 等^[27]利用琥珀酸放线杆菌直接利用菜粕作为可再生资源液态发酵生产琥珀酸,这个发酵过程将糖化和发酵进行了整合,同时将稀硫酸或酶水解等应用于菜粕的预处理过程。在糖化阶段,总糖含量增加了 66%,可发酵利用的总糖(主要为蔗糖和葡萄糖)浓度达到 28.6g/L。使用浓度为 20.5% 的菜粕进行流加培养同时糖化发酵,琥珀酸浓度达到 23.4g/L,琥珀酸生产强度为 0.33g/(L·h)。2012 年, Yao 等^[28]使用枯草芽孢杆菌对菜粕进行固态发酵,该菌可同时生产伊枯草菌素(一种广谱抗真菌型脂肽)和聚- γ -谷氨酸(增肥剂),发酵 90h 伊枯草菌素和聚- γ -谷氨酸的产量分别达 5.3g/kg-干基质和 51.3g/kg-干基质。Kiran 等^[6]将低价格菜粕原料经过生物预处理后作为培养基进行流加培养生产微生物油脂,使产油圆红冬孢酵母菌株的细胞干重达 82.3g/L,酵母中脂肪含量达 48%。由于生物处理后的培养基中氮源含量较高,细胞干重比在常规氮源酵母粉培养下高,所得的微生物油脂中脂肪酸与菜籽油相似。2013 年, Kiran 等通过实验进一步证实,相对于价格昂贵的商业氮源酵母粉而言,经生物预处理后的菜粕生物培养液作为氮源发酵生产生物油脂的效果更佳^[29]。García 等^[30]利用经米曲霉固态发酵后的菜粕水解液作为营养补充物,通过钩虫贪铜菌 *C. necator* 液态发酵生产生物塑料聚羟基脂肪酸酯(PHA),PHA 产量达到 10.9g/L,表明菜粕水解液具有作为微生物营养物生产 PHA 的潜能。最近,笔者所在团队利用菜籽饼粕作为主要原料,开发出了利用枯草芽孢杆菌固态/液态发酵生产功能性脂肽新工艺,同时利用曲霉等丝状真菌降解菜籽饼粕可获得营养丰富的水解液,其总糖、可溶性糖和总氮可分别高达 8.03、3.78 和 36.39g/L。实验证明用该水解液做培养基,完全可替代常用的工业发酵用培养基培养功能藻类生产多不饱和脂肪酸 DHA 等(待发表)。

4 结论与展望

综上,采用生物技术法对菜籽饼粕进行处理,能够有效降低菜籽饼粕中毒性物质含量、改善饼粕的饲用品质、显著提高饼粕作为植物蛋白源在饲料中的添加量。同时,生物技术尤其是微生物发酵技术为低值饼粕的高值化利用开辟了新的应用前景。但是,目前能够高效利用菜籽饼粕的微生物资源仍十分有限,所报道的能够直接分解利用饼粕的微生物以水解能力较强的丝状真菌和芽孢杆菌为主,而工业发酵生产中的主要微生物如细菌和酵母菌等,对饼粕的利用效率仍然很低;饼粕往往需要经过预处理后才能被它们吸收利用。为进一步开发菜籽饼粕的高值化应用潜能,笔者认为,针对目前饼粕生物技术开发中存在的上述问题,今后的研究应集中在如下几个方面:

(1)加强对菜籽饼粕特异性高效降解菌株的筛选,进一步提高饼粕的脱毒效率和饲用品质。相对于单一菌株发酵而言,多菌种混合发酵下的饼粕脱毒效果更好。但是,混合发酵模式下制约最终发酵菜粕品质的因素也更多,操作控制也显得更为复杂,使得不同批次下的发酵菜粕品质难以保持稳定。因此,从确保发酵生产稳定和商业化应用的角度,还需要进一步加大对菜籽饼粕特异性高效降解菌株的筛选及研发力度。

(2)开展不同微生物降解利用饼粕的机理以及不同微生物之间相互协作关系研究。多菌种混合发酵过程中,不同文献报道所使用的微生物种类和最佳发酵工艺条件都不尽相同,没有一种相对统一的发酵生产模式可供参考。而且,大多数研究者所关注的重点在混合发酵条件对饼粕的脱毒效率和饲用效果上。由于不清楚各菌株对饼粕的作用机制及不同菌种间的相互作用关系,使得多菌种混合发酵工艺的优化存在盲目性。因此,深入研究不同微生物之间的相互作用关系可以为菜籽饼粕的高效利用和发酵工艺优化提供理论指导。

(3)加强饼粕高效生物预处理技术的开发,进一步提高菜籽饼粕中主要营养物质的释放效率。对于很多重要的工业微生物而言,由于缺乏能够分解利用饼粕中营养物质的酶系,对饼粕的直接利用效率低,饼粕往往需要经过预处理后才能被这些微生物有效利用。但是,目前仍缺乏高效、统一的菜粕生物预处理技术。因此,需要加强对饼粕高效预处理技术的研究,为推动饼粕在这些工业微生物的利用提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 李文林,黄凤洪,彭 健,等. 脱皮双低菜籽粕的开发和饲用研究[J]. 中国油脂,2006,31(3):51-54.
- [2] Lomascolo A, Uzan - Boukhris E, Sigoillot J C, et al. Rapeseed and sunflower meal: A review on biotechnology status and challenges[J]. Applied Microbiology and Biotechnology,2012,95(5):1 105-1 114.
- [3] Bell J M. Nutrients and toxicants in rapeseed meal:A review[J]. J Anim Sci,1984,58(4):996-1 010.
- [4] Clandinin D R, Robblee A R, Slinger S J. et al. Composition of canola meal[A]. Canola meal for livestock and poultry[M]. Winnipeg, Manitoba:Canola Council of Canada,1981.8-11.
- [5] Fang Z F, Peng J, Liu Z L, et al. Responses of non - starch polysaccharide - degrading enzymes on digestibility and performance of growing pigs fed a diet based on corn, soya bean meal and Chinese double - low rape seed meal[J]. The Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition,2007,91:361-368.
- [6] Kiran E U, Salakkam A, Trzcinski A P, et al. Enhancing the value of nitrogen from rapeseed meal for microbial oil production[J]. Enzyme and Microbial Technology, 2012,50(6-7):337-342.
- [7] Khajali F, Slominski B A. Factors that affect the nutritive value of canola meal for poultry[J]. Poultry Science, 2012,91(10):2 564-2 575.
- [8] Tripathi M K, Mishra A S. Glucosinolates in animal nutrition:A review[J]. Animal Feed Science and Technology,2007,132:1-27.
- [9] 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]. Bioresource Technology,2001,78(3):309-312.
- [10] 王汉中. 我国油菜产业发展的历史回顾与展望[J]. 中国油料作物学报,2010,32(2):300-302.
- [11] Mahajan A, Dua S. Role of enzymatic treatments in modifying the functional properties of rapeseed (*Brassica campestris* var toria) meal[J]. International Journal of Food Sciences and Nutrition,1998,49:435-440.
- [12] Mahajan A, Dua S. Improvement of functional properties of rapeseed (*Brassica campestris* var toria) meal by reducing anti - nutritional factors employing enzymatic modification[J]. Food Hydrocolloids, 1998, 12: 349-355.
- [13] Fang Z F, Peng J, Tang T J, et al. Xylanase supplementation improved digestibility and performance of growing pigs fed Chinese double - low rapeseed meal inclusion diets: *in vitro* and *in vivo* studies[J]. Asian -

- Australia Journal of Animal Science, 2007, 20: 1 721 – 1 728.
- [14] Simbaya J, Slominski B A, Guenter W, et al. The effects of protease and carbohydrase supplementation on the nutritive value of canola meal for poultry: *In vitro* and *in vivo* studies[J]. Animal Feed Science and Technology, 1996, 61(1–4): 219–234.
- [15] Pustjens A M, de Vries S, Gerrits W J, et al. Residual carbohydrates from *in vitro* digested processed rapeseed (*Brassica napus*) meal[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(34): 8 257–8 263.
- [16] Rozan P, Villaume C, Bau H M, et al. Detoxication of rapeseed meal by *Rhizopus oligosporus* sp – T3: a first step towards rapeseed protein concentrate [J]. International Journal of Food Science and Technology, 1996, 31: 85–90.
- [17] 高冬余, 李吕木, 许发芝, 等. 微生物固态厌氧发酵菜籽粕的研究[J]. 食品与发酵工业, 2010, 36(3): 75–79.
- [18] Zuchowski J, Pecio L, Jaszek M, et al. Solid – State fermentation of rapeseed meal with the white – rot fungi *Trametes versicolor* and *Pleurotus ostreatus* [J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2013, 171(8): 2 075–2 081.
- [19] 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]. Annals of Microbiology, 2012, 62(3): 1 013–1 020.
- [20] Sarikaya A, Ladisch R. An unstructured mathematical model for growth of *Pleurotus ostreatus* on lignocellulosic material in solid – state fermentation systems [J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 1997, 62: 71–85.
- [21] Gattinger L D, Duvnjak Z, Khan A W. The use of canola meal as a substrate for xylanase production by *Trichoderma reesei* [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1990, 33: 21–25.
- [22] Yeoman K H, Edwards C. Protease production by *Streptomyces thermovulgaris* grown on rapemeal – derived media [J]. The Journal of Applied Bacteriology, 1994, 77: 264–270.
- [23] Freitas A C, Castro R J S, Fontenele M A, et al. Canola cake as a potential substrate for proteolytic enzymes production by a selected strain of *Aspergillus oryzae*: selection of process conditions and product characterization [J]. ISRN Microbiology, 2013, 2013: 1–8.
- [24] Ebune A, Al – A sheh S, Duv njak Z. Production of phytase during solid – state fermentation using *Aspergillus ficuum* NRRL3135 in canola meal [J]. Bioresource Technology, 1995, 53: 7–12.
- [25] Rajoka M I, Huma T, Khalid A M, et al. Kinetics of enhanced substrate consumption and endo – β – xylanase production by a mutant derivative of *Humicola lanuginosa* in solid – state fermentation [J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2005, 21: 869–876.
- [26] Wang R H, Shaarani S M, Godoy L C, et al. Bioconversion of rapeseed meal for the production of a generic microbial feedstock [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2010, 47(3): 77–83.
- [27] Chen K Q, Zhang H, Miao Y L, et al. Simultaneous saccharification and fermentation of acid – pretreated rapeseed meal for succinic acid production using *Actinobacillus succinogenes* [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2011, 48(4–5): 339–344.
- [28] Yao D H, Ji Z X, Wang C J, et al. Co – producing iturin A and poly – γ – glutamic acid from rapeseed meal under solid state fermentation by the newly isolated *Bacillus subtilis* strain 3 – 10 [J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2012, 28(3): 985–991.
- [29] Kiran E U, Trzcinski A, Webb C. Microbial oil produced from biodiesel by – products could enhance overall production [J]. Bioresource Technology, 2013, 129: 650–654.
- [30] García I L, López J A, Dorado M P, et al. Evaluation of by – products from the biodiesel industry as fermentation feedstock for poly (3 – hydroxybutyrate – co – 3 – hydroxyvalerate) production by *Cupriavidus necator* [J]. Bioresource Technology, 2013, 130: 16–22.

(责任编辑:郭学兰)