DOI: 10.3969/j.issn.2097-583X.2026.04.017　　文章编号：2097-583X(2026)04-0639-07

芽孢杆菌固态发酵对油茶饼粕饲用营养成分的影响

熊天真[1,2*]，李树青[1]，李馨梦[1]，郑慧玲[1]，王东冉[1]，刘雅琪[1]，
孙　晴[1]，陈　震[1,2]

(1. 信阳师范大学 茶学与食品学院/河南省油茶生物学与高值化利用国际联合实验室/
河南省茶树生物学重点实验室，河南 信阳 464000；2. 大别山实验室，河南 信阳 464000)

摘　要：油茶饼粕是生产饲料的潜在原料，然而油茶饼粕营养不均衡且含有抗营养因子，阻碍其在饲料中的应用。微生物固态发酵能够通过代谢作用优化油茶饼粕营养组成，减少抗营养因子含量。以饲料添加安全的芽孢杆菌为出发菌株，研究固态发酵后油茶饼粕中多酚、黄酮、粗蛋白质、氨基酸，以及茶皂素、单宁含量的变化情况。结果表明，固态发酵后，油茶饼粕中多酚、黄酮含量略有下降，粗蛋白质、单宁、茶皂素含量显著降低。发酵后酪氨酸含量略微减少，其余氨基酸含量得到增加，其中地衣芽孢杆菌发酵后的油茶饼粕中茶皂素降解率最高。油茶饼粕中茶皂素降解发酵条件的优化，最佳的固态发酵条件为初始含水率100%、温度35 ℃、接种量8%、发酵时间60 h。

关键词：油茶饼粕；芽孢杆菌；固态发酵；饲料；抗营养因子

中图分类号：TS201.3　　**文献标志码：**A　　**开放科学(资源服务)标识码(OSID)：**

Research on the effects of *Bacillus* solid-state fermentation on the nutritional value of *Camellia* seed cake

Xiong Tianzhen[1,2*], Li Shuqing[1], Li Xinmeng[1], Zheng Huiling[1], Wang Dongran[1], Liu Yaqi[1], Sun Qing[1], Chen Zhen[1,2]

(1. Key Laboratory of Tea Plant Biology of Henan Province/Henan International Joint Laboratory of Tea-oil Tree Biology and High Value Utilization/School of Tea and Food Science, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China;
2. Dabie Mountain Laboratory, Xinyang 464000, China)

Abstract: *Camellia* seed cake was a potential raw material for feed production. However, the nutritional composition of *Camellia* seed cake was imbalanced, and it contains anti-nutritional factors, which hinder was application in feed. Microbial solid-state fermentation can optimize the nutritional composition of *Camellia* seed cake through metabolic processes and reduce the content of anti-nutritional factors. *Bacillus* strain which was safe for feed application was used as the starting strain to investigate the changes in the contents of polyphenols, flavonoids, crude protein, amino acids, as well as tea saponins and tannins, in *Camellia* seed cake after solid-state fermentation. The results showed that, after solid-state fermentation, the contents of polyphenols and flavonoids were slightly reduced, crude protein, tannins and tea saponin in *Camellia* seed cake were significantly reduced. After fermentation, the tyrosine content slightly decreased, while the contents of other amino acids increased. Among them, the tea saponin degradation rate was the highest in *Camellia* seed cake fermented with *Bacillus licheniformis*. Through the optimization of fermentation conditions for tea saponin degradation in *Camellia* seed cake, the optimal

收稿日期：2026-01-23；**修回日期：**2026-03-12；*. **通信联系人**，E-mail：tzxiong@xynu.edu.cn

基金项目：国家自然科学基金项目(22208276)；河南省科技攻关项目(252102310350)；河南省高等学校重点科研项目(24B180017)

作者简介：熊天真(1990—)，男，河南信阳人，讲师，博士，主要从事农业废弃物的应用研究。

引用格式：熊天真，李树青，李馨梦，等. 芽孢杆菌固态发酵对油茶饼粕饲用营养成分的影响[J]. 信阳师范大学学报(自然科学版)，2026，39(4)：639-645.

Xiong Tianzhen, Li Shuqing, Li Xinmeng, et al. Research on the effects of *Bacillus* solid-state fermentation on the nutritional value of *Camellia* seed cake[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2026, 39(4): 639-645.

solid-state fermentation conditions were determined to be initial water ratio of 100%, temperature of 35 ℃, inoculum size of 8%, and fermentation time of 60 h.

Key words: *Camellia* seed cake; *Bacillus*; solid-state fermentation; feed; antinutritional factors

0　引言

近年来,畜禽养殖业迅猛发展,大量饲料依赖于国外进口,以填补国内市场缺口[1],优质饲料的短缺日益成为限制养殖业发展的突出问题[2-4]。油茶树是一种优良的木本油料作物,广泛生长于河南、湖南、江西、福建、安徽等省份。油茶籽中含油量为25%～33%,因其脂肪酸组成、脂肪特性和营养成分与橄榄油极为相似,茶籽油也被称为"东方橄榄油"。茶籽饼是茶籽油生产的副产品,中国每年产生的茶籽饼数量约为1000万t。茶籽饼具有较高的经济价值,因其富含蛋白质、多糖和多酚,是潜在的饲料来源。但茶籽饼中含有单宁、茶皂素等抗营养因子,这些抗营养因子的存在使饲用动物腹泻,影响动物的消化吸收,是限制油茶饼粕用于饲料的关键因素[5]。在这些抗营养因子中,茶皂素是其主要成分[6],茶籽饼中约含有10%～15%的茶皂素。如果茶籽饼中茶皂素含量超过10%,它对冷血动物(如鱼、泥鳅、青蛙)具有强烈的溶血性和毒性。温血动物的茶皂素安全摄入茶皂素量为每天50～150 mg/kg,茶皂素的存在限制了茶籽饼在饲料中的应用。茶籽饼作为油料生产过程中的一种副产品,通常会被丢弃,从而造成资源浪费。

芽孢杆菌是一类对动物健康有益的菌株,能够改善肠道微环境,对炎症引起的肠功能紊乱和腹泻有良好的疗效[7]。芽孢杆菌在发酵饲料中的应用显著提升了饲料的营养价值与生物功能。以枯草芽孢杆菌、地衣芽孢杆菌等为代表的菌种,通过分泌淀粉酶、蛋白酶、纤维素酶等酶类,可将豆粕、玉米秸秆等原料中的大分子物质(如纤维素、蛋白质)降解为葡萄糖等易吸收成分,同时降低抗营养因子含量。例如,枯草芽孢杆菌发酵玉米秸秆时,其还原糖含量可提高3.24倍,粗纤维降解率达37.76%,同时补充微量元素,提升饲料利用率。此外,芽孢杆菌发酵过程中产生的有机酸(如乙酸、丙酸、丁酸)可降低动物肠道pH值,抑制大肠杆菌等有害菌生长,为乳酸菌等益生菌创造厌氧环境,从而调节肠道菌群平衡,增强动物免疫力。罗彦玉等[8]利用蜡样芽孢杆菌作为出发菌株,通过固态发酵进行油茶饼粕中茶皂素的降解研究及单因素试验和响应面优化实验,最终油茶饼粕中茶皂素的降解率达到76.04%。随后,该团队又利用枯草芽孢杆菌作为出发菌株通过响应面法优化发酵降解油茶饼粕茶皂素工艺,最终茶皂素降解率达到72.18%[9]。

芽孢杆菌的代谢产物进一步强化了发酵饲料的功能性。其产生的抑菌物质(如枯草菌素、杆菌肽、多黏菌素)可抑制病原菌繁殖,减少抗生素使用需求。例如,枯草芽孢杆菌发酵液对大肠杆菌的抑菌圈直径可达30 mm,雏鸡灌服后存活率提高18.18%;发酵豆渣后,氨基酸含量提升78%,抗氧化剂活性增强6.4倍。同时,芽孢杆菌还能合成维生素(如维生素C、维生素B)、促生长因子等,提升动物生产性能。在母猪饲料中添加15%玉米-豆粕复合发酵饲料,可提高仔猪断奶窝重、减少背膘损失,并提升乳汁中免疫球蛋白A水平;在仔猪饲料中添加5%发酵饲料,可降低腹泻率,效果与抗生素相当。此外,芽孢杆菌的芽孢形态使其耐高温、耐酸耐碱,便于加工储存,且在肠道内快速萌发,确保益生作用持久稳定,为无抗养殖提供了高效的解决方案。

芽孢杆菌对油茶饼粕发酵的研究虽已取得一定进展,但评价指标往往局限于茶皂素等单一抗营养因子的降解,忽视了发酵过程中营养成分的动态转化,导致对饲用价值综合提升效果的研究缺乏系统性。研究以《饲料添加剂品种目录(2013)》中允许添加的芽孢杆菌作为出发菌株,对油茶饼粕进行固态发酵,研究发酵后油茶饼粕中多酚、黄酮、粗蛋白质、氨基酸、茶皂素、单宁含量的变化情况,旨在揭示其在降解抗营养因子的同时,改善油茶饼粕营养结构的作用,为油茶饼粕用于饲料的开发提供理论依据和实验基础。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

油茶饼粕由河南省联兴油茶产业开发有限公司提供,饼粕于常规冷榨出山茶籽油的过程中产

生。芽孢杆菌是先前从油茶树根系土壤中筛选鉴定出来的[10]。

香草醛和茶皂素标准品购自上海阿拉丁生化科技股份有限公司。氯化铝、蒽酮、盐酸、碳酸钠、福林酚、氯化钠、浓硫酸、无水乙醇均购自国药集团药业股份有限公司。

1.2 主要仪器与设备

DHG-9140A电热鼓风干燥箱(上海一恒科学仪器有限公司),LYZ-103B恒温摇床(上海龙跃仪器设备有限公司),SW-CJ-1CU超净工作台(苏州安泰空气技术有限公司),GI54DWS高压灭菌锅(美国致微仪器制造有限公司),DHP9012电热恒温培养箱(上海灯晟仪器制造有限公司),SG5200HBT超声波清洗机(河南佳越仪器设备有限公司),K1100F凯氏定氮仪(山东海能科学仪器有限公司),759S紫外可见分光光度计(上海棱光技术有限公司),5424R型台式高速冷冻离心机(德国艾本德股份公司)。

1.3 培养基及样品制备

种子培养基:15 g氯化钠、15 g牛肉膏、10 g蛋白胨、1000 mL蒸馏水、pH 7.2。

固态发酵培养基:45 g油茶饼粕、1.5 g葡萄糖、50 mL蒸馏水。

种子液制备:将−80 ℃保藏的芽孢杆菌菌株3 μL接种于含有3 mL种子培养基的试管,过夜培养(37 ℃、220 r/min)。然后将培养的菌液0.5 mL接种于含有50 mL种子培养基的三角瓶,37 ℃、220 r/min条件下培养至600 nm处的吸光度值为4.5(用紫外可见分光光度计在600 nm处测定吸光度值)。

样品前处理工序:将油茶饼粕放入电热鼓风干燥箱进行干燥处理,然后使用粉碎机对干燥的饼粕进行粉碎,将粉碎后的油茶饼粕过40目筛。接着称取一定总量的样品,加入一定比例的蒸馏水,搅拌均匀,进行灭菌(121 ℃、20 min)。

油茶饼粕醇提工艺:乙醇浓度85%、液料比10 mL/g,提取时间15 min、提取温度90 ℃。

1.4 油茶饼粕中组成成分的测定

采用凯氏定氮法测定油茶饼粕中粗蛋白质含量[11],总黄酮含量使用刘雯等(2025年)描述的方法测定[12],多酚含量使用刘雯等(2025年)描述的方法测定[12],单宁含量使用林淼等(2023年)描述的方法测定[13],氨基酸含量使用张涛等(2023年)描述的方法测定[14],所有实验均重复3次。

1.5 茶皂素含量的测定

采用密闭条件下进行加热提取的方法对油茶饼粕中的茶皂素进行提取[15]。通过硫酸-香草醛显色方法测定油茶饼粕中的茶皂素含量[16]。具体测定流程为:将0.5 mL香草醛乙醇溶液(8%)加入0.5 mL的茶皂素提取液中。接着在冰水浴的情况下加入4 mL硫酸溶液(77%),振荡混合均匀,在60 ℃下水浴10 min,然后冷却到室内温度,使用紫外可见分光光度计在550 nm波长下测定吸光度。所有实验均重复3次。

茶皂素标准曲线的绘制:分别配制0.0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mg/mL的茶皂素标准溶液,按照上述硫酸-香草醛显色法操作流程进行样品处理,最后在550 nm波长下测定吸光度。

$$茶皂素降解率=(C_0-C)/C_0\times 100\%, \quad (1)$$

式中:C_0为发酵前饼粕的茶皂素含量,单位mg/g;C为发酵后饼粕中的茶皂素含量,单位mg/g。

1.6 固态发酵降解茶皂素的条件优化

为了优化初始含水率,设定温度30 ℃,接种量10%,发酵时间60 h。分别在初始含水率为60%、70%、80%、90%、100%、110%、120%的条件下,进行油茶饼粕的固态发酵,发酵完成后,测定茶皂素的降解率。为了优化温度,设定初始含水率100%、接种量10%、发酵时间60 h。分别在温度为20、25、30、35、40、45、50 ℃的条件下,进行油茶饼粕的固态发酵,发酵完成后,测定茶皂素的降解率。为了优化接种量,设定初始含水率100%、温度35 ℃、发酵时间60 h。分别在接种量为1%、2%、4%、6%、8%、10%、12%的条件下,进行油茶饼粕的固态发酵,发酵完成后,测定茶皂素的降解率。为了研究发酵时间对油茶饼粕中茶皂素降解的情况,设定初始含水率90%、温度35 ℃、接种量10%,然后进行油茶饼粕的固态发酵。分别在发酵时间为0、12、24、36、48、60、72 h时取样,测定油茶饼粕中茶皂素的降解率。所有实验均重复3次。

2 结果与讨论

2.1 固态发酵出发菌株的选择

先前的研究从油茶树根系土壤中筛选鉴定出多个不同种类的芽孢杆菌菌株。研究选取中华人民共和国农业农村部发布的《饲料添加剂品种目录(2013)》中允许添加的枯草芽孢杆菌(XY1)、短

小芽孢杆菌(XY10)、地衣芽孢杆菌(XY22)、侧孢短芽孢杆菌(XY25)、凝结芽孢杆菌(XY41)作为出发菌株,研究上述5种菌株对油茶饼粕中营养成分及抗营养因子含量的影响。

2.2　油茶饼粕的化学成分分析

采用标准曲线法对油茶饼粕中的化学成分进行测定,结果如表1所示。油茶饼粕原材料主要由粗蛋白质(115.46 mg/g)和茶皂素(106.72 mg/g)组成,同时还观察到少量其他成分,包括黄酮(23.44 mg/g)、多酚(10.56 mg/g)、单宁(16.81 mg/g)。研究表明[17],在油茶籽饼中发现众多有价值的化合物,主要成分为粗蛋白质(15.94%)和皂苷(12.80%),其他成分包括粗脂肪6.64%、粗纤维6.00%、可溶性糖4.30%、矿物质3.37%、单宁2.00%、维生素、多酚。实验结果表明,在油茶饼粕原材料中检测到的化学成分与之前报道的值相似。在油茶饼粕1原料中,含有大量的茶皂素(106.72 mg/g)和黄酮类化合物(23.44 mg/g),该成分对芽孢杆菌有抑制作用。因此,在进行固态发酵之前,通过有机溶剂萃取的方式去除这些化合物。在经过有机溶剂萃取后,检测到的油茶饼粕2中的小分子(多酚、黄酮、单宁、茶皂素)的含量降低,粗蛋白质含量基本没有变化。

使用不同的芽孢杆菌对油茶饼粕进行固态发酵,粗蛋白质、黄酮、多酚、单宁和茶皂素的含量均有下降。其中地衣芽孢杆菌固态发酵后的油茶饼粕(油茶饼粕2-XY22)的粗蛋白质和茶皂素含量降幅最高,其粗蛋白质含量下降了78.37%,降到24.50 mg/g;茶皂素含量下降了56.57%,降到5.92 mg/g;单宁含量下降了89.69%,降到0.26 mg/g。黄酮和多酚的含量均略有下降。使用地衣芽孢杆菌固态发酵后的油茶饼粕的抗营养因子单宁和茶皂素大幅度降低,展现了将油茶饼粕用于蛋白饲料的良好应用前景。然而油茶饼粕中的茶皂素含量仍然较高,需要对芽孢杆菌固态发酵条件进行优化,以提高油茶饼粕中茶皂素的降解率。

表1　油茶饼粕的化学组成成分分析

Tab. 1　Analysis of chemical composition of *Camellia* seed cake

样品	含量/(mg/g)				
	粗蛋白质	黄酮	多酚	单宁	茶皂素
油茶饼粕1	115.46±2.56	23.44±1.15	10.56±0.75	16.81±0.36	106.72±3.58
油茶饼粕2	113.25±1.26	8.75±0.46	1.68±0.11	2.52±0.12	13.63±0.73
油茶饼粕2-XY1	45.66±2.57	8.35±0.43	1.33±0.06	1.54±0.08	11.94±0.58
油茶饼粕2-XY10	68.47±1.89	7.86±0.27	1.14±0.03	1.35±0.06	7.25±0.36
油茶饼粕2-XY22	24.50±1.21	7.23±0.17	1.27±0.07	0.26±0.01	5.92±0.36
油茶饼粕2-XY25	62.75±2.43	7.62±0.36	0.85±0.02	0.98±0.02	9.83±0.53
油茶饼粕2-XY41	56.73±2.57	7.55±0.28	0.93±0.03	1.22±0.05	10.65±0.43

注　油茶饼粕1:油茶饼粕;油茶饼粕2:醇提后的油茶饼粕;油茶饼粕2-XY1:使用枯草芽孢杆菌固态发酵后的油茶饼粕;油茶饼粕2-XY10:使用短小芽孢杆菌固态发酵后的油茶饼粕;油茶饼粕2-XY22:使用地衣芽孢杆菌固态发酵后的油茶饼粕;油茶饼粕2-XY25:使用侧孢短芽孢杆菌固态发酵后的油茶饼粕;油茶饼粕2-XY41:使用凝结芽孢杆菌固态发酵后的油茶饼粕。

2.3　不同固态发酵条件对油茶饼粕中茶皂素含量的影响

水分含量低,能够抑制微生物的生长代谢;水分含量高,会影响菌体对氧气的吸收,进而导致菌体生长缓慢。因此,首先对固态发酵的初始含水率进行优化,结果如图1a所示。当初始含水率为60%~100%时,随着初始含水率的增加,茶皂素降解率逐渐增加。原因可能为,随着初始含水率的增加,微生物活力增强,增加了对茶皂素的分解[18]。初始含水率为100%时,茶皂素降解率最高。当初始含水率大于100%时,随着初始含水率的增加,茶皂素降解率逐渐降低。可能由于含水率过高,有效空隙被水充满,妨碍空气的通透和氧的供应,从而影响微生物的呼吸作用和代谢速率[19]。选择初始含水率为100%,其中短小芽孢杆菌固态发酵后的油茶饼粕茶皂素降解率最低,达到76.29%。地衣芽孢杆菌固态发酵后的油茶饼粕茶皂素降解率最高,达到89.48%。

温度能够通过影响微生物胞内酶的活性来影响其生长代谢以及发酵产物的积累,高温会使酶的活力丧失,低温会降低酶活性[20]。因此,对发酵温度进行优化,结果如图1b所示。当发酵温度为

20～35 ℃时,随着发酵温度的增加,茶皂素降解率逐渐增加。温度为35 ℃时,茶皂素降解率最高。当发酵温度高于35 ℃时,随着发酵温度的增加,茶皂素降解率逐渐降低。选择温度为35 ℃,其中短小芽孢杆菌固态发酵后的油茶饼粕茶皂素降解率最低,地衣芽孢杆菌固态发酵后的油茶饼粕茶皂素降解率最高。

接种量能够影响菌体的生长速度,进而影响菌体对油茶饼粕中茶皂素的降解能力[21]。因此,对接种量进行优化,结果如图1c所示。当接种量为1%～8%时,随着接种量的增加,茶皂素降解率逐渐增加,从60.38%提高到76.57%。原因可能为,接种量的增加,使菌体能够较快地到达对数期,微生物生长能力增加,进而增加了对茶皂素的分解[22]。接种量为8%时,茶皂素降解率最高。当接种量大于8%时,随着接种量的增加,茶皂素降解率逐渐降低。可能由于接种量过高,细胞间的竞争和营养物质的限制影响了微生物的代谢活动,进而降低对茶皂素的分解作用。选择接种量为8%,其中短小芽孢杆菌固态发酵后的油茶饼粕茶皂素降解率最低。地衣芽孢杆菌固态发酵后的油茶饼粕茶皂素降解率最高。

发酵时间对茶皂素降解率的影响如图1d所示,当发酵时间为0～60 h时,随着发酵时间的推移,茶皂素降解率逐渐增加。原因为,菌株在生长过程中代谢了油茶饼粕中的茶皂素。发酵时间为60 h时,茶皂素降解率最高。当发酵时间为60～72 h时,茶皂素降解率基本保持不变,可能由于长时间的发酵,饼粕中营养成分耗尽及菌体活力下降,从而影响了对茶皂素的降解[23]。考虑到时间因素,选取发酵时间60 h,其中短小芽孢杆菌固态发酵后的油茶饼粕茶皂素降解率最低,达到78.64%。地衣芽孢杆菌固态发酵后的油茶饼粕茶皂素降解率最高,达到96.26%。

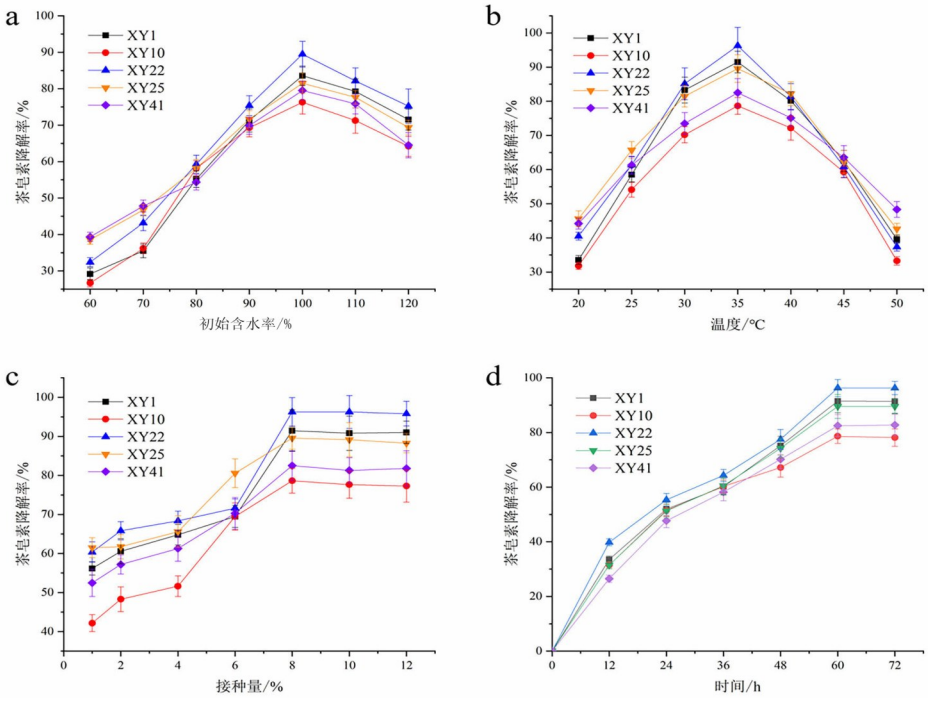


图1　不同芽孢杆菌及固态发酵条件对油茶饼粕中茶皂素降解率的影响

Fig. 1　The influence of different solid-state fermentation conditions on the degradation rate of tea saponin in *Camellia* seed cake

注 a. 初始含水率对茶皂素降解率的影响;b. 温度对茶皂素降解率的影响;c. 接种量对茶皂素降解率的影响;d. 发酵时间对茶皂素降解率的影响。

2.4　固态发酵对油茶饼粕中氨基酸含量的影响

以油茶饼粕为培养基,在使用芽孢杆菌进行固态发酵后,粗蛋白质含量的减少,可能是生成氨基酸造成的。因此,进一步确定了醇提后的油茶饼粕中的氨基酸组成。结果表明(表2),油茶饼粕中共检测到17种氨基酸,其中酪氨酸的含量最高(2.857 mg/g),其次是天冬氨酸(0.263 mg/g)和精氨酸(0.152 mg/g),氨基酸总量为3.604 mg/g。

使用不同的芽孢杆菌对油茶饼粕进行固态发酵后,除酪氨酸外的其他氨基酸含量均提高。其中短小芽孢杆菌(XY10)进行24 h发酵后,酪氨酸的含量降至1.849 mg/g,这表明在固态发酵过程中,酪氨酸可能被用作氮源,从而被利用。酪氨酸含量下降这一结果与Yao等[24]在枯草芽孢杆菌发酵油茶饼粕中的发现一致。相比之下,其他16种氨基酸的含量均有所增加。而在发酵后的油茶饼粕中,酪氨酸的含量最高(2.439 mg/g),其次是半胱氨酸(1.446 mg/g)和缬氨酸(1.391 mg/g)。发酵后油茶饼粕中氨基酸总量增加(最大含量达12.985 mg/g),这与杨欣等关于枯草芽孢杆菌发酵可提升紫苏饼粕的氨基酸含量的结论高度吻合[25]。表明在发酵过程中由芽孢杆菌产生的蛋白酶能够很好地水解油茶饼粕中的粗蛋白质生成氨基酸。

表2　不同油茶饼粕中氨基酸的组成和含量

Tab. 2　Composition and content of amino acids in different *Camellia* seed cake

氨基酸	氨基酸含量/(mg/g)					
	油茶饼粕2	油茶饼粕 2-XY1	油茶饼粕 2-XY10	油茶饼粕 2-XY22	油茶饼粕 2-XY25	油茶饼粕 2-XY41
天冬氨酸	0.263±0.005	0.158±0.012	0.429±0.010	0.567±0.029	0.512±0.027	0.482±0.019
谷氨酸	0.071±0.002	0.632±0.023	0.531±0.023	0.823±0.034	0.794±0.034	0.539±0.026
丝氨酸	0.003±0.000	0.006±0.000	0.005±0.000	0.007±0.000	0.012±0.013	0.005±0.000
组氨酸	0.021±0.001	0.095±0.001	0.104±0.008	0.124±0.013	0.139±0.037	0.103±0.034
甘氨酸	0.019±0.001	0.758±0.025	1.249±0.085	1.061±0.067	0.831±0.029	0.894±0.027
苏氨酸	0.051±0.002	0.114±0.012	0.117±0.011	0.133±0.014	0.103±0.017	0.123±0.049
精氨酸	0.152±0.038	0.285±0.015	0.322±0.026	0.344±0.018	0.314±0.016	0.301±0.017
丙氨酸	0.038±0.001	0.358±0.026	0.413±0.018	0.401±0.027	0.369±0.014	0.386±0.013
酪氨酸	2.857±0.129	2.439±0.083	1.849±0.114	2.127±0.094	2.013±0.078	2.031±0.158
半胱氨酸	0.015±0.001	1.231±0.047	1.248±0.068	1.446±0.083	1.243±0.054	1.285±0.077
缬氨酸	0.058±0.001	1.218±0.094	1.138±0.053	1.391±0.042	1.034±0.059	1.328±0.055
蛋氨酸	0.002±0.000	0.241±0.016	0.315±0.014	0.327±0.019	0.315±0.016	0.295±0.015
苯丙氨酸	0.023±0.001	0.844±0.029	0.859±0.029	1.082±0.037	0.854±0.029	1.032±0.037
异亮氨酸	0.006±0.001	0.423±0.014	0.428±0.013	0.514±0.026	0.502±0.038	0.485±0.029
亮氨酸	0.011±0.001	0.859±0.038	1.238±0.078	1.186±0.099	1.214±0.055	1.154±0.067
赖氨酸	0.009±0.001	1.031±0.059	1.029±0.053	1.123±0.055	1.048±0.083	1.124±0.055
脯氨酸	0.005±0.000	0.185±0.013	0.273±0.016	0.329±0.017	0.325±0.018	0.295±0.015
总含量	3.604±0.053	10.877±0.632	11.547±0.326	12.985±0.686	11.622±0.594	11.862±0.748

3　结束语

本研究利用芽孢杆菌对油茶饼粕进行固态发酵,并对茶皂素的降解条件进行工艺优化。最优固态发酵条件为:初始含水率100%、发酵温度35 ℃、接种量8%、发酵时间60 h,使用地衣芽孢杆菌的茶皂素降解率达到96.26%。氨基酸组成表明,发酵后的油茶饼粕主要由酪氨酸、半胱氨酸、甘氨酸、缬氨酸、亮氨酸、赖氨酸组成。芽孢杆菌进行固态发酵后,油茶饼粕中除酪氨酸外的氨基酸含量显著增加,其中地衣芽孢杆菌固态发酵后的氨基酸含量高且茶皂素降解率高。后续研究将对油茶饼粕中所含的生物活性肽进行鉴定和验证,以便进一步加深芽孢杆菌固态发酵油茶饼粕对营养成分含量变化的理解。本研究证实芽孢杆菌固态发酵能够增加油茶饼粕中氨基酸含量,降低茶皂素含量,为油茶饼粕在饲料中的应用提供理论依据和实验基础。

参考文献:

[1] Chang Yihai, Saeed Omer S H, Li Gaoqiang, et al. Research advance on application of microbial fermented fodder in broilers production: a short review[J]. Open Journal of Animal Sciences, 2022, 12(2): 200-209.

[2] 尹杰, 刘红南, 李铁军, 等. 我国蛋白质饲料资源短缺现状与 解决方案[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(1): 89-93.

[3] 朱翠翠, 王海英, 赵玉莹, 等. 鱼露中组胺降解菌的分离筛选及耐受性[J]. 食品与生物技术学报, 2022, 41(3): 8-15.
[4] 纪剑, 于坚, 王良哲, 等. 真菌毒素的降解技术研究进展[J]. 食品与生物技术学报, 2022, 41(5): 1-10.
[5] Gemede H F, Ratta N. Antinutritional factors in plant foods: potential health benefits and adverse effects[J]. International Journal of Nutrition and Food Sciences, 2014, 3(4): 284-289.
[6] Sarmah K, Das P, Saikia G K, et al. Biochemical characterization of tea (*Camellia* spp) seed oil cake[J]. Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences, 2018, 7(8): 98-102.
[7] Muras A, Romero M, Mayer C, et al. Biotechnological applications of *Bacillus licheniformis*[J]. Critical Reviews in Biotechnology, 2021, 41(4): 609-627.
[8] 罗彦玉, 王磊, 邹春霞, 等. 固态发酵降解油茶饼粕中茶皂素工艺优化及成分的分析[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(9): 150-158.
[9] 罗彦玉, 王磊, 邹春霞, 等. 枯草芽孢杆菌降解油茶饼中茶皂素及成分变化[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(17): 161-167.
[10] 熊天真, 张继婷, 张灿, 等. 油茶苗根系土壤中芽孢杆菌的筛选及促生效应研究[J]. 信阳师范大学学报(自然科学版), 2025, 38(1): 34-40.
[11] 李明, 董春柳. 全量凯氏定氮法测定两种饲料粗蛋白含量的研究[J]. 养殖技术顾问, 2013(3): 203.
[12] 刘雯, 刘帆, 李锦华, 等. 香蕉叶总黄酮和总酚的含量测定及抗氧化活性分析[J]. 中南农业科技, 2025, 46(11): 52-55.
[13] 林森, 杨海锋, 时文兴, 等. 核桃不同部位单宁含量测定方法研究[J]. 安徽农学通报, 2023, 29(16): 78-80.
[14] 张涛, 许鹏, 韦媛荣, 等. 叶喷硒肥对澳洲坚果果实硒与游离氨基酸含量的影响[J]. 热带农业科学, 2023, 43(12): 5-17.
[15] 田漫漫, 张进芳, 王秋萍, 等. 正交试验优化密封加热浸提油茶饼粕中茶皂素工艺的研究[J]. 中国食品添加剂, 2017(10): 61-65.
[16] Fu Guiming, Chen Kedan, Wang Jiantao, et al. Screening of tea saponin-degrading strain to degrade the residual tea saponin in tea seed cake[J]. Preparative Biochemistry and Biotechnology, 2020, 50(7): 697-707.
[17] Luan Fei, Zeng Jiuseng, Yang Yan, et al. Recent advances in *Camellia oleifera* Abel: a review of nutritional constituents, biofunctional properties, and potential industrial applications[J]. Journal of Functional Foods, 2020, 75: 104242.
[18] Gervais P, Molin P. The role of water in solid-state fermentation[J]. Biochemical Engineering Journal, 2003, 13(2/3): 85-101.
[19] 陈冠益, 周腾, 宋英今, 等. 基于固态发酵的非常规饲料资源增值化利用研究进展[J]. 环境工程, 2023, 41(7): 252-259, 270.
[20] Lu Feng, Alenyorege E A, Ouyang Ningning, et al. Simulated natural and high temperature solid-state fermentation of soybean meal: a comparative study regarding microorganisms, functional properties and structural characteristics[J]. LWT, 2022, 159: 113125.
[21] Egbune E O, Anigboro A A, Edeche G, et al. Effect of inoculum size on solid state fermentation of cassava (*Manito esculenta Crantz*)[J]. Chemistry Africa, 2023, 6(6): 2911-2917.
[22] Egbune E O, Orhonigbe I, Adheigu R O, et al. Effect of inoculum size on solid state fermentation of pearl millet (*Pennisetum glaucum*) by *Rhizopus oligosporus*[J]. Nigerian Journal of Science and Environment, 2021, 19(1): 1-9.
[23] Lee J H, Hwang C E, Son K S, et al. Comparisons of nutritional constituents in soybeans during solid state fermentation times and screening for their glucosidase enzymes and antioxidant properties[J]. Food Chemistry, 2019, 272: 362-371.
[24] Yao Lingyun, Huang Qingru, Wang Huatian, et al. Microbial hydrolysis of *Camellia* seed cake with *Bacillus subtilis*: fermentation process optimization and bioactivity assessment of the hydrolysates[J]. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 2025, 66: 103579.
[25] 杨欣, 杨孟, 胡萍, 等. 单菌剂固态发酵改善紫苏饼粕工艺优化及理化特性分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(4): 266-273.

责任编辑:任长江　王　萍