

## 豆粕酶解工艺中常用酶制剂的酶学性质研究进展

刘闯<sup>1,2</sup>, 马建爽<sup>2</sup>, 柏映国<sup>2</sup>, 黄火清<sup>2</sup>, 涂涛<sup>2</sup>, 于会民<sup>2</sup>, 刘宁<sup>1\*</sup>, 王苑<sup>2\*</sup>

1.河南科技大学动物科技学院, 河南 洛阳 471023;

2.中国农业科学院北京畜牧兽医研究所, 北京 100193

**摘要:** 豆粕作为重要的植物蛋白来源,在饲料和食品工业中应用广泛。然而,豆粕中抗营养因子(如抗原蛋白、非淀粉多糖等)的存在限制了其营养价值。酶解加工工艺是近年来新兴的一种改善豆粕营养价值的原料体外预处理方法,常用的酶制剂种类包括蛋白酶、纤维素酶、半乳糖苷酶等。总结了豆粕中抗营养因子的种类、不同的酶制剂及其作用机制、酶制剂的应用研究进展,旨在为豆粕酶解工艺中酶制剂的选择提供理论依据和技术参考。

**关键词:** 豆粕;酶解;抗营养因子;酶制剂

DOI:10.19586/j.2095-2341.2025.0055

中图分类号:Q814.4

文献标志码:A

## Research Progress on the Enzymatic Properties of Common Enzyme Preparations in Soybean Meal Enzyme Hydrolysis Processes

LIU Chuang<sup>1,2</sup>, MA Jianshuang<sup>2</sup>, BAI Yingguo<sup>2</sup>, HUANG Huoqing<sup>2</sup>, TU Tao<sup>2</sup>, YU Huimin<sup>2</sup>, LIU Ning<sup>1\*</sup>, WANG Yuan<sup>2\*</sup>

1.College of Animal Science and Technology, Henan University of Science and Technology, Henan Luoyang 471023, China;

2.Institute of Animal Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China

**Abstract:** Soybean meal serves as an important plant protein source widely utilized in feed and food industries. However, the presence of anti-nutritional factors (such as antigenic protein and non-starch polysaccharides) limits its nutritional value. Enzymatic hydrolysis has emerged as a novel in vitro pretreatment method to enhance the nutritional quality of soybean meal, with commonly used enzymes including proteases, cellulases, and galactosidases. The review systematically summarized the types of anti nutritional factor in soybean meal, different enzyme preparations and their mechanisms of action, and the research process on the application of enzyme preparations, aiming to provide theoretical foundations and technical references for enzyme selection in soybean meal enzymatic hydrolysis processes.

**Keywords:** soybean meal; enzymolysis; antinutritional factors; enzyme preparations

豆粕是大豆榨油后的主要副产品,富含蛋白质和氨基酸,粗蛋白质含量高达40%以上,是重要的饲料蛋白原料。然而,豆粕中存在的抗营养因子(如胰蛋白酶抑制剂、植酸和寡糖等)不仅降低了其营养价值,还可能对动物和人类的消化吸收产生不利影响。豆粕酶解工艺通过酶制剂的作用,能够有效降解这些抗营养因子,释放豆粕中的

营养物质,提高其消化率和利用率。

近年来,随着酶制剂生产及应用技术的快速发展,多种酶制剂被广泛应用于豆粕酶解工艺中。然而,不同酶制剂的作用机制、酶解条件及效果存在显著差异,如何选择合适的酶制剂并优化酶解工艺已成为近年来的研究热点。本文旨在分析酶制剂的作用机制、酶解条件及对豆粕营养价

收稿日期:2025-04-29; 接受日期:2025-06-03

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD1300205);国家肉鸡产业技术体系项目(CARS-41)。

联系方式:刘闯 E-mail: liuchuang20252025@163.com

\*通信作者 刘宁 E-mail: ningliu68@163.com;王苑 E-mail: wangyuan08@caas.cn

值的提升效果,系统总结了豆粕酶解工艺中酶制剂的选择,对于推动豆粕在饲料中的高效利用及在相关领域的研究和工业化应用,具有重要的经济和社会意义。

## 1 大豆中的抗营养因子

影响豆粕利用率的主要因素是大豆中存在抗营养因子(antinutritional factors, ANFs),其中抗原蛋白、半乳糖类物质和非淀粉多糖(non-starch polysaccharides, NSP)是重要的组成部分。

### 1.1 抗原蛋白

豆粕的抗原蛋白是目前豆粕作为饲料添加剂的最大限制因素,主要包括大豆球蛋白和 $\beta$ -伴大豆球蛋白,这两种蛋白占总蛋白的70%以上。大豆球蛋白是一种六聚体蛋白,由6个亚基组成,每个亚基包含一条酸性多肽链(A链)和一条碱性多肽链(B链),通过二硫键连接,分子量约为300~

350 kD,具有高度有序的三级结构,抗原表位主要位于酸性链和碱性链的表面<sup>[1]</sup>。杨玉娟等<sup>[2]</sup>调查了国内65批次豆粕,测得其中大豆球蛋白含量为58.90~204.30 mg·g<sup>-1</sup>(表1)。 $\beta$ -伴大豆球蛋白则是一种三聚体蛋白,由3个亚基( $\alpha$ 、 $\alpha'$ 和 $\beta$ 链)组成,分子量约为140~180 kD,具有球状结构,抗原表位主要位于 $\alpha$ 和 $\alpha'$ 链的表面,特别是其N端和C端区域<sup>[3]</sup>。 $\beta$ -伴大豆球蛋白作为大豆贮藏蛋白7S的主要成分,其含量仅次于大豆球蛋白,是大豆中另一类重要的贮藏蛋白。研究表明,国内65批次豆粕中 $\beta$ -伴大豆球蛋白的含量范围在42.80~185.80 mg·g<sup>-1</sup>(表1),这一数据进一步凸显了其在大豆及其加工产物中的重要地位<sup>[2]</sup>。此外,这两种蛋白均具有热稳定性和抗消化性,部分抗原表位在高温或消化过程中仍能保留免疫原性。这些结构特性使大豆抗原蛋白成为引发大豆过敏的主要因素,了解其特性对于开发低敏大豆制品、研究过敏机制以及改进食品加工技术具有重要意义。

表1 酶解豆粕与普通豆粕的大豆球蛋白、 $\beta$ -伴大豆球蛋白和水苏糖含量对比<sup>[2]</sup>

Table 1 Comparative analysis of glycinin,  $\beta$ -conglycinin, and stachyose contents in enzymatically hydrolyzed soybean meal versus conventional soybean meal<sup>[2]</sup>

| 样品名称 | 大豆球蛋白/(mg·g <sup>-1</sup> ) | $\beta$ -伴大豆球蛋白/(mg·g <sup>-1</sup> ) | 水苏糖/(mg·g <sup>-1</sup> ) |
|------|-----------------------------|---------------------------------------|---------------------------|
| 酶解豆粕 | 0.13~62.78                  | 1.74~53.54                            | 0.40~34.52                |
| 普通豆粕 | 58.90~204.30                | 42.80~185.80                          | 16.59~48.67               |

### 1.2 胰蛋白酶抑制剂

胰蛋白酶抑制剂(trypsin inhibitors, TIs)是一类广泛存在于植物中的蛋白质或肽类化合物,是豆粕中主要的抗营养因子,最高可占总蛋白含量的10%左右<sup>[4]</sup>。TIs主要分为Kunitz型(KTI)和Bowman-Birk型(BBTI)。其中,KTI分子量约为18~22 kD,具有 $\beta$ -trefoil结构,主要抑制胰蛋白酶和凝乳蛋白酶。而BBTI分子量为6~9 kD,具有双活性位点,能同时抑制胰蛋白酶、凝乳蛋白酶和弹性蛋白酶<sup>[5]</sup>。这些抑制剂在大豆中的含量约为总蛋白酶抑制剂的6%,对大豆的营养价值和消化性有显著影响<sup>[6]</sup>。它们通过与胰蛋白酶的活性位点结合,阻止其对底物的水解,从而阻碍动物对膳食蛋白质的消化吸收,最终导致胰腺肥大/增生,影响动物生长<sup>[7]</sup>。尽管KTI和BBTI在热处理过程中表现出不同的稳定性,但过度加热会降低大豆的营养价值。因此,在大豆酶解过程中,选择具有高亲和力和良好稳定性的酶制剂,如凝乳蛋白酶,可以更

有效地降解TIs,提高大豆的营养价值和消化性<sup>[8]</sup>。

### 1.3 半乳糖类物质

大豆中的半乳糖类物质属于 $\alpha$ -半乳糖苷类化合物,是一种低聚糖,主要包括棉子糖(raffinose)、水苏糖(stachyose)和大豆凝集素等。棉子糖是一种三糖,由半乳糖、葡萄糖和果糖通过 $\alpha$ -1,6和 $\alpha$ -1,2糖苷键连接而成,易溶于水。水苏糖是一种四糖,由2个半乳糖、1个葡萄糖和1个果糖通过 $\alpha$ -1,6和 $\alpha$ -1,2糖苷键连接而成,同样易溶于水。它们的功能主要与肠道微生物的代谢相关,由于单胃动物缺乏分解 $\alpha$ -半乳糖苷键的酶(如 $\alpha$ -半乳糖苷酶),因此这些物质不能被直接消化吸收。当它们进入大肠后,会被肠道微生物发酵,产生气体(如氢气、二氧化碳和甲烷)以及短链脂肪酸。这种发酵过程虽然可以为肠道益生菌提供能量,有益肠道健康,但也会导致胀气、腹胀和腹部不适等消化问题,甚至可能引发腹泻或肠道炎症,

影响动物的生长性能和饲料利用率<sup>[9]</sup>。大豆凝集素在豆粕中的有效含量大概是3.0%,属于大豆中重要的抗营养因子之一。抗营养因子凝集素主要表现为抑制蛋白质的消化和利用,由1种和糖蛋白或者碳水有机类化学物质结合力非常强的蛋白质构成<sup>[9]</sup>。大豆凝集素的结构由等量的2种略微不同的4个亚基组成,其中1种亚基能够特异性地与血细胞表面凝血素识别的糖基结合,而另1种亚基则与另1类血细胞的糖基结合。这种独特的结合机制会导致凝集素破坏畜禽肠道黏膜的完整性,干扰消化酶的正常分泌,从而影响营养物质的消化和吸收效率<sup>[10-11]</sup>。此外,过量摄入半乳糖类物质还可能干扰营养物质的吸收效率,特别是对蛋白质和矿物质的利用。

#### 1.4 非淀粉多糖

豆粕中的非淀粉多糖(NSP)是一类复杂的碳水化合物,主要包括纤维素、果胶和甘露聚糖。其中,纤维素是由 $\beta$ -1,4糖苷键连接的葡萄糖单元组成的线性多糖,是植物细胞壁的主要成分之一,具有高度的结晶性和抗酶解性,难以被单胃动物的内源性酶分解,因此无法被直接吸收利用<sup>[12]</sup>。纤维素在肠道中主要起到增加食糜体积和促进肠道蠕动的作用,但过量摄入会降低饲料的能量密度和营养物质的消化率。甘露聚糖是一种半纤维素,主要由甘露糖单元通过 $\beta$ -1,4糖苷键连接而成,广泛存在于豆科植物中。由于其结构特点,甘露聚糖难以被动物消化,会增加食糜的黏度,从而干扰消化酶的活性,降低蛋白质、脂肪和淀粉的消化效率<sup>[13]</sup>。此外,甘露聚糖能够结合肠道中的病原菌,抑制其增殖,发挥一定的益生元功能,有助于维持肠道健康。然而,过量摄入甘露聚糖可能引起肠道胀气和腹泻等问题,对动物的健康产生不利影响<sup>[14-15]</sup>。综上所述,豆粕中抗原蛋白的含

量较多,且热稳定性强,容易引起动物生产性能下降,需要重点关注抗原蛋白的去除。

豆粕中抗营养因子的消除方法主要包括物理、化学和生物3大类。物理方法如热处理(蒸汽、膨化)和超声波处理,虽然操作简单但难以彻底降解热稳定性高的植酸和寡糖。化学方法如酸碱处理和氧化剂降解效率较高,但存在化学残留风险且可能破坏营养成分。生物方法中的微生物发酵和酶解法因具有高效性和安全性成为主要选择,其中酶解法通过特异性酶在温和条件下精准降解抗营养因子,具有反应快速、条件可控和营养保留好等优势<sup>[16]</sup>。酶制剂具有高效、特异性强、条件温和等优点,能够在不破坏豆粕营养成分的前提下,有效降低抗营养因子的含量,提高豆粕的营养价值和利用率,是未来豆粕加工和饲料改良的重要发展方向。

## 2 降解豆粕抗营养因子的有效酶制剂

### 2.1 蛋白酶

蛋白酶作为降解大豆抗营养因子的有效酶制剂,主要来源于微生物、植物及动物,其通过水解肽键分解大豆抗原蛋白,根据催化机制和底物特异可分为丝氨酸蛋白酶(EC 3.4.21)、半胱氨酸蛋白酶(EC 3.4.22)、天冬氨酸蛋白酶(EC 3.4.23)和金属蛋白酶(EC 3.4.24)<sup>[17]</sup>,其分类及特性如表2所示。

通过Uniport蛋白数据库搜索大豆球蛋白和 $\beta$ -伴大豆球蛋白的公开序列对氨基酸组成进行统计分析(图1),并根据氨基酸的R基特性和带电特性进行分组统计(表3)。结果可以发现,大豆球蛋白和 $\beta$ -伴大豆球蛋白中的疏水氨基酸含量最高分别为43.38%和41.16%。因此,在有降解大豆球蛋白和 $\beta$ -伴大豆球蛋白需求的产品中,

表2 不同蛋白酶的分类及特性

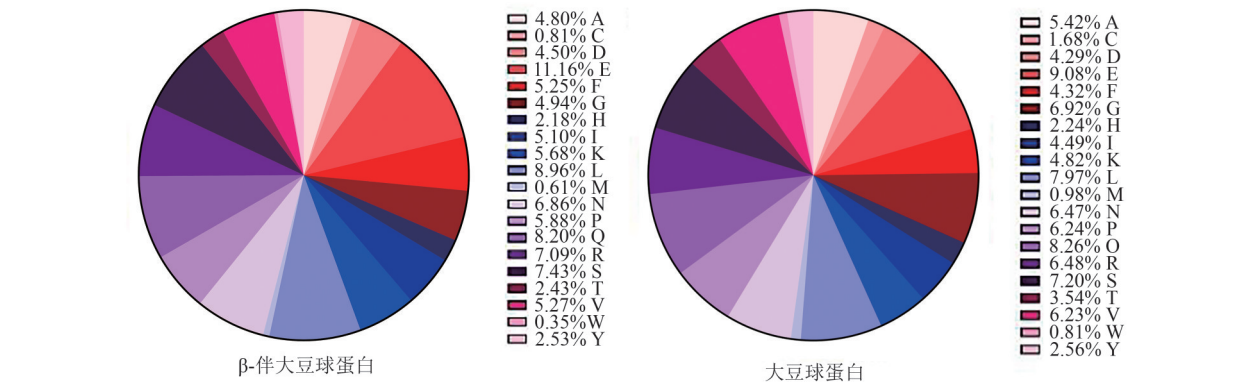
Table 2 Classification and characteristics of different proteases

| 名称     | 来源      | 种类     | 底物偏好性                   | 最适 pH/<br>耐受 pH | pH 耐受<br>时间 | 最适 温度/<br>耐受温度/℃ | 高温耐<br>受时间 | 参考<br>文献 |
|--------|---------|--------|-------------------------|-----------------|-------------|------------------|------------|----------|
| 胰凝乳蛋白酶 | 金黄色葡萄球菌 | 丝氨酸蛋白酶 | 疏水性芳香族氨基酸(苯丙氨酸、酪氨酸、色氨酸) | 8.5/5.0~10.0    | 100 h       | 40/40~60         | 5 h        | [18]     |
| 胰凝乳蛋白酶 | 日本鳗鲡    | 丝氨酸蛋白酶 | 疏水性芳香族氨基酸(苯丙氨酸、酪氨酸、色氨酸) | 8.0/4.5~11.0    | 30 min      | 40/30            | 60 min     | [19]     |
| 胰蛋白酶   | 动物(胰腺)  | 丝氨酸蛋白酶 | 疏水性芳香族氨基酸(苯丙氨酸、酪氨酸、色氨酸) | 7.5-8.5/7.0-9.0 | ND          | 37~40/30~45      | ND         | [20-21]  |

续表

| 名称               | 来源                | 种类          | 底物偏好性                                                             | 最适 pH/<br>耐受 pH     | pH 耐受<br>时间 | 最适 温度/<br>耐受温度/℃ | 高温耐<br>受时间 | 参考<br>文献 |
|------------------|-------------------|-------------|-------------------------------------------------------------------|---------------------|-------------|------------------|------------|----------|
| 弹性<br>蛋白酶        | 黑曲霉               | 丝氨酸蛋<br>白酶  | 作用于小侧链疏水氨基酸(如<br>丙氨酸、缬氨酸、亮氨酸)的羧<br>基端肽键,尤其适合切割弹性<br>蛋白等富含此类氨基酸的底物 | ND                  | ND          | ND               | ND         | [22]     |
| 弹性<br>蛋白酶        | 黄曲霉               | 丝氨酸蛋<br>白酶  |                                                                   |                     |             |                  |            |          |
| 弹性<br>蛋白酶        | 猪胰脏               | 丝氨酸蛋<br>白酶  |                                                                   |                     |             |                  |            |          |
| 弹性<br>蛋白酶        | 地衣芽孢<br>杆菌        | 丝氨酸蛋<br>白酶  | 疏水性芳香族氨基酸(苯丙氨<br>酸、酪氨酸、色氨酸)                                       | 7.4/ND              | ND          | 55/ND            | ND         | [23]     |
| 弹性<br>蛋白酶        | 短芽孢<br>杆菌         | 丝氨酸蛋<br>白酶  | 疏水性芳香族氨基酸(苯丙氨<br>酸、酪氨酸、色氨酸)                                       | 9.5/7.0~<br>11.5    | 1 h         | 20/40~50         | 1 h        | [24]     |
| 弹性<br>蛋白酶        | 铜绿假<br>单胞菌        | 丝氨酸蛋<br>白酶  | 疏水性芳香族氨基酸(苯丙氨<br>酸、酪氨酸、色氨酸)                                       | 7.4/3.0~<br>5.0     | 4 h         | 28~37/<br>28~37  | 3 h        | [25]     |
| 枯草杆菌<br>蛋白酶      | 枯草杆菌              | 丝氨酸蛋<br>白酶  | 对疏水氨基酸(如亮氨酸、异亮<br>氨酸)附近的肽键有较高活性                                   | 7.0/6.0~<br>8.0     | 12 h        | 60~70/<br>20~40  | 1 h        | [26]     |
| SPRK<br>蛋白酶 K    | 沙雷氏菌              | 丝氨酸蛋<br>白酶  | 对疏水氨基酸(如亮氨酸、异亮<br>氨酸)附近的肽键有较高活性                                   | 10.5/ND             | 24 h        | 70/70            | 19 min     | [27]     |
| AQUI<br>蛋白酶 K    | 水生嗜热<br>杆菌 YT-1   | 丝氨酸蛋<br>白酶  | 对疏水氨基酸(如亮氨酸、异亮<br>氨酸)附近的肽键有较高活性                                   | ND                  | ND          | 80/70~80         | 30 min     | [28]     |
| TPRK<br>蛋白酶 K    | 林伯氏白<br>色念球菌      | 丝氨酸蛋<br>白酶  | 对疏水氨基酸(如亮氨酸、异亮<br>氨酸)附近的肽键有较高活性                                   | 9.0/7.0~<br>11.0    | 2 d         | 65/45~55         | 100 min    | [29]     |
| 嗜热蛋白<br>酶 Th0724 | 极端嗜热<br>细菌 HB8    | 丝氨酸蛋<br>白酶  | 疏水性/中性蛋白底物具有较<br>强水解能力                                            | 7.0/ND              | ND          | 70~80/80         | 150 min    | [30]     |
| 胃蛋白酶             | ND                | 天冬氨酸<br>蛋白酶 | 疏水氨基酸(如苯丙氨酸、酪<br>氨酸、亮氨酸、异亮氨酸)的氨<br>基端肽键                           | 2.0/2.0~<br>5.0     | 1 h         | 60/55~70         | 30 min     | [31]     |
| 胃蛋白酶             | 动物(胃)             | 天冬氨酸<br>蛋白酶 | 疏水氨基酸(如苯丙氨酸、酪<br>氨酸、亮氨酸、异亮氨酸)的氨<br>基端肽键                           | 2.0~3.0             | 1.5~4.0     | 37~40/ND         | 30 min     | [20-21]  |
| 嗜热菌<br>蛋白酶       | 嗜热解<br>蛋白芽孢<br>杆菌 | 金属蛋<br>白酶   | 疏水性氨基酸(亮氨酸、苯丙<br>氨酸)                                              | 7.0/ND              | ND          | 70~80/80         | 150 min    | [32]     |
| 嗜热菌蛋<br>白酶       | 无氧芽胞<br>杆菌属       | 金属蛋<br>白酶   | 疏水氨基酸(如亮氨酸、异亮<br>氨酸、缬氨酸、苯丙氨酸)的羧<br>基端肽键,尤其偏好脂肪族疏<br>水残基           | 7.0/ND              | ND          | 55/ND            | ND         | [33]     |
| 组织<br>蛋白酶 L      | 牛胰脏               | 半胱氨酸<br>蛋白酶 | 疏水氨基酸(如亮氨酸、苯丙氨<br>酸)相邻的肽键有较高亲和力                                   | 6.5/3.0~<br>8.0     | 1 h         | 40~50/40         | 1 h        | [34]     |
| 组织<br>蛋白酶 L      | 虾肝胰腺              | 半胱氨酸<br>蛋白酶 | 疏水氨基酸(如亮氨酸、苯丙氨<br>酸)相邻的肽键有较高亲和力                                   | 5.5/5.5~<br>6.5     | 30 min      | 35/4~30          | 30 min     | [35]     |
| 组织<br>蛋白酶 B      | 红鳍<br>东方鲀         | 半胱氨酸<br>蛋白酶 | ND                                                                | 7.0~8.0/<br>3.5~8.0 | 30 min      | 45~50/20~<br>50  | 30 min     | [36]     |
| 组织<br>蛋白酶 L      | 红鳍<br>东方鲀         | 半胱氨酸<br>蛋白酶 | ND                                                                | 6.0~7.0/<br>3.5~6.5 | 30 min      | 45~50/20~<br>50  | 30 min     | [36]     |
| 木瓜<br>蛋白酶        | 木瓜乳汁              | 半胱氨酸<br>蛋白酶 | 广谱水解,偏好疏水/芳香族氨<br>基酸(苯丙氨酸、酪氨酸)及酰<br>基转移反应                         | 6.0~7.0/<br>4.0~9.0 | ND          | 40~60/≤60        | 30 min     | [37]     |
| 木瓜<br>蛋白酶        | 木瓜乳汁              | 半胱氨酸<br>蛋白酶 | 广谱水解(偏好疏水/芳香族氨<br>基酸)                                             | 7.0/5.0~<br>9.0     | ND          | 50/≤60           | 90 min     | [38]     |

注:ND表示无。



注:图中字母代表氨基酸;A—丙氨酸;C—半胱氨酸;D—天冬氨酸;E—谷氨酸;F—苯丙氨酸;G—甘氨酸;H—组氨酸;I—异亮氨酸;K—赖氨酸;L—亮氨酸;M—甲硫氨酸;N—天冬酰胺;P—脯氨酸;Q—谷氨酰胺;R—精氨酸;S—丝氨酸;T—苏氨酸;V—缬氨酸;W—色氨酸;Y—酪氨酸。

图1  $\beta$ -伴大豆球蛋白、大豆球蛋白的氨基酸含量  
Fig. 1 Amino acid composition of  $\beta$ -conglycinin and glycinin

表3 对氨基酸的R基特性和带电特性进行分组统计

Table 3 Grouping statistics based on R-group properties and charge characteristics of amino acids

| 类别  | 氨基酸组成   | $\beta$ -伴大豆球蛋白含量/% | 氨基酸总和/% | 大豆球蛋白含量/% | 氨基酸总和/% |
|-----|---------|---------------------|---------|-----------|---------|
| 疏水  | A(丙氨酸)  | 4.80                |         | 5.42      |         |
|     | F(苯丙氨酸) | 5.25                |         | 4.32      |         |
|     | I(异亮氨酸) | 5.10                |         | 4.49      |         |
|     | L(亮氨酸)  | 8.96                |         | 7.97      |         |
|     | M(甲硫氨酸) | 0.61                | 41.16   | 0.98      | 43.38   |
|     | P(脯氨酸)  | 5.88                |         | 6.24      |         |
|     | V(缬氨酸)  | 5.27                |         | 6.23      |         |
|     | G(甘氨酸)  | 4.94                |         | 6.92      |         |
|     | W(色氨酸)  | 0.35                |         | 0.81      |         |
| 带电荷 | D(天冬氨酸) | 4.50                |         | 4.29      |         |
|     | E(谷氨酸)  | 11.20               |         | 9.08      |         |
|     | K(赖氨酸)  | 5.68                | 30.61   | 4.82      | 26.91   |
|     | R(精氨酸)  | 7.09                |         | 6.48      |         |
|     | H(组氨酸)  | 2.18                |         | 2.24      |         |
| 带羟基 | S(丝氨酸)  | 7.43                |         | 7.20      |         |
|     | T(苏氨酸)  | 2.43                | 12.39   | 3.54      | 13.3    |
|     | Y(酪氨酸)  | 2.53                |         | 2.56      |         |
| 带苯环 | F(苯丙氨酸) | 5.25                |         | 4.32      |         |
|     | W(色氨酸)  | 0.35                | 8.13    | 0.81      | 7.69    |
|     | Y(酪氨酸)  | 2.53                |         | 2.56      |         |

优先使用可以降解疏水氨基酸的角蛋白酶和木瓜蛋白酶可以提高这2种抗原蛋白的降解率。

根据目前已有的报道,在诸多的酶试剂中,针对豆粕中最难处理的抗原蛋白,蛋白酶是最有效的酶试剂。虽然蛋白酶对抗原蛋白的消解具有显

著的效果,但并非所有的蛋白酶对豆粕抗原蛋白均有很好的消解效果,需进行比较和筛选以确定最佳酶解水平,并优化相应的工艺技术,形成可应用于工业生产的最佳工艺流程。豆粕在酶解过程中,蛋白酶的热稳定性是一个重要影响因素,同时

酶试剂在豆粕营养价值改善中最重要限制因素是酶的成本,故提高酶的产量和比活是降低酶成本的一个重要方面。

## 2.2 半乳糖苷酶

半乳糖苷酶是一类特异性催化 $\alpha$ -或 $\beta$ -半乳糖苷键水解的糖苷水解酶,作为降解豆粕中 $\alpha$ -半乳糖苷类抗营养因子(如棉子糖、水苏糖)的关键酶制剂,其通过分解豆粕中的低聚糖类物质,能够有效减少单胃动物肠道胀气并提升营养吸收效率<sup>[39]</sup>。典型的 $\alpha$ -半乳糖苷酶分子量介于40~80 kD,催化结构域多呈现( $\beta/\alpha$ )桶状折叠,部分酶含碳水化合物

物结合模块(carbohydrate binding module, CBM),可增强对豆粕细胞壁底物的识别能力,而耐热型酶(如*Thermotoga maritima*来源)通过疏水核心强化及二硫键网络维持高温稳定性。其作用机理表现为:特异性水解 $\alpha$ -1,6-半乳糖苷键,将棉子糖、水苏糖等抗营养因子分解为半乳糖和蔗糖,消除其抑制肠道消化的特性<sup>[40-41]</sup>;协同破坏豆粕细胞壁中的半乳甘露聚糖结构,释放被包裹的蛋白质和脂类;降低肠道内容物渗透压,减少微生物发酵产生的气体(如甲烷、二氧化碳)<sup>[42]</sup>。不同来源 $\alpha$ -半乳糖苷酶的功能特性如表4所示。

表4 不同来源 $\alpha$ -半乳糖苷酶的功能特性

Table 4 Functional characteristics of  $\alpha$ -galactosidases from different sources

| 来源              | 底物     | 最适 pH/<br>耐受 pH  | pH 耐受<br>时间 | 最适温度/<br>耐受温度/°C | 高温耐受<br>时间 | 酶活/<br>(U·mg <sup>-1</sup> ) | 参考<br>文献 |
|-----------------|--------|------------------|-------------|------------------|------------|------------------------------|----------|
| 植物乳杆菌 MTCC 5422 | 棉子糖    | 5.8/4.8~6.2      | 12 h        | 45/55            | 30 min     | 12.0                         | [43]     |
| 莱氏篮状菌 JCM12802  | pNPGal | 4.0/3.0~11.0     | 1 h         | 70/65            | 1 h        | 389.8                        | [44]     |
| 链球菌 S1          | pNPG   | 6.5/7.5~10.0     | ND          | 50/40            | 1 h        | 508.3                        | [45]     |
| 弯曲乳杆菌 R08       | 水苏糖    | 6.5~7.0/6.5~10.5 | ND          | 37/30~50         | 3 h        | 2.7                          | [46]     |
| 费氏新萨托菌 P1       | pNPGal | 4.5/2.0~12.0     | 1 h         | 60~70/60         | 10 min     | 449.5                        | [47]     |
| 黑曲霉变种 RM48      | pNPGal | 4.5/3.5~6.0      | 1 h         | 60/40            | ND         | 5 618.0                      | [48]     |
| 酵母菌             | pNPGal | 4.0/ND           | ND          | 70/70            | 15 min     | 100.0                        | [49]     |
| 费氏新萨托菌 P1       | pNPGal | 4.5/3.0~10.0     | 15 min      | 60~70/70         | 15 min     | 423.0                        | [47]     |
| 双孢霉 MEY-1       | pNPGal | 3.5/2.2~8.0      | 60 min      | 55/65            | 60 min     | 612.9                        | [50]     |
| 巨大芽孢杆菌          | pNPGal | 5.0/4.0~9.0      | 60 min      | 50/55            | 30 min     | 303.0                        | [51]     |
| 灰绿青霉            | 半乳寡糖   | 5.0/4.0~6.0      | 3 h         | 65/60            | 3 h        | 296.0                        | [52]     |

注:ND表示无。

## 2.3 纤维素酶

纤维素酶是一类特异性降解纤维素及其衍生物的多酶复合体系,作为降解豆粕抗营养因子的关键酶制剂,主要靶向破坏豆粕细胞壁结构并消除纤维类抗营养因子。工业用纤维素酶多来源于真菌(如木霉属*Trichoderma reesei*、黑曲霉*Aspergillus niger*)和细菌(如枯草芽孢杆菌*Bacillus subtilis*)<sup>[53]</sup>。典型的纤维素酶体系由内切- $\beta$ -1,4-葡聚糖酶(EC 3.2.1.4)、外切- $\beta$ -1,4-葡聚糖酶(EC 3.2.1.91)和 $\beta$ -葡萄糖苷酶(EC 3.2.1.21)3类组分构成<sup>[54]</sup>。其作用机制表现为:内切酶随机切断纤维素链无定形区,暴露出大量游离末端;外切酶从还原端或非还原端持续水解产生纤维二糖; $\beta$ -葡萄糖苷酶将纤维二糖转化为葡萄糖,最终瓦解豆粕细胞壁的物理屏障<sup>[55]</sup>。在家禽和家

畜的饲料中添加纤维素酶制剂,可以将原本难以消化的纤维素和半纤维素有效地转化为糖类有机物。这一过程不仅提升了饲料的利用效率,还促进了动物的消化吸收功能,从而确保了动物的健康成长<sup>[56]</sup>。表5展示了不同来源纤维素酶的功能特性。

## 2.4 $\beta$ -葡萄糖苷酶

$\beta$ -葡萄糖苷酶是一类专一性水解 $\beta$ -1,4糖苷键的糖苷水解酶,广泛存在于微生物(如真菌、细菌)、植物(大豆、杏仁)和动物肠道共生菌中,其核心功能是将纤维二糖等 $\beta$ -糖苷类化合物分解为葡萄糖或释放活性苷元,如大豆异黄酮苷元。它属于纤维素酶的一大类,是纤维素水解过程中的限速酶<sup>[68]</sup>。多数 $\beta$ -葡萄糖苷酶能够同时水解多种糖苷键,并且在众多的底物中对纤维二糖或对

表5 不同来源纤维素酶的功能特性

Table 5 Functional characteristics of cellulases from different sources

| 来源          | 底物     | 最适 pH/<br>耐受 pH | pH 耐受<br>时间    | 最适温度/<br>耐受温度/°C | 高温耐受<br>时间 | 酶活/<br>(U·mL <sup>-1</sup> ) | 参考<br>文献 |
|-------------|--------|-----------------|----------------|------------------|------------|------------------------------|----------|
| 草酸青霉        | CMC-Na | 7.0/5.0~9.0     | 72 h           | 28/24~32         | 72 h       | 74.1                         | [57]     |
| 点斑嗜菌霉       | CMC-Na | 5.5/4.0~9.0     | 1 h(52%<br>以上) | 55/80            | 15 min     | 105.6                        | [58]     |
| 贝莱斯芽孢杆菌     | CMC-Na | 5.5~6.5/4.0~9.5 | ND             | 50/30~60         | ND         | 125.9                        | [59]     |
| 地衣芽孢杆菌      | CMC-Na | 7.0/5.5~7.5     | ND             | 37/28~45         | ND         | 181.2                        | [60]     |
| 解脂耶氏酵母菌     | CMC-Na | 6.0/3.0~7.0     | 72 h           | 30/30~39         | 72 h       | 1.3                          | [61]     |
| 棘孢木霉        | 蛋白胨    | 4.0/3.5~5.0     | 24 h           | 50/45~55         | 30 min     | 2.8                          | [62]     |
| 枯草芽孢杆菌      | 蛋白胨    | 6.1/5.5~6.6     | 96 h           | 37/34~40         | 96 h       | 222.0                        | [63]     |
| 白耙齿菌和栓孔菌    | 乳糖     | 6.0/4.0~8.0     | 4 d            | 28/24~32         | 4 d        | 112.1                        | [64]     |
| 枯草芽孢杆菌      | CMC-Na | 6.0/5.0~7.5     | 2 d            | 37/30~40         | 2 d        | 39.0                         | [65]     |
| 解淀粉芽孢杆菌植物亚种 | CMC-Na | 7.0/3.0~11.0    | 60 h           | 37/33~41         | 60 h       | 21.0                         | [66]     |
| 贝莱斯芽孢杆菌     | CMC-Na | 5.26/ND         | 6 d            | 34.73/ND         | 6 d        | 233.5                        | [67]     |

注:ND表示无。

硝基苯-β-D-葡萄糖苷有最好的水解能力。该酶通过切断抗营养因子(如大豆苷、单宁)的β-糖苷键,释放易吸收的苷元和葡萄糖,从而降低抗营养

性并提升饲料或食品的营养利用率,兼具高效专一性和耐酸耐温特性<sup>[69]</sup>。表6展示了不同来源β-葡萄糖苷酶的功能特性。

表6 不同来源β-葡萄糖苷酶的功能特性

Table 6 Functional characteristics of β-glucosidases from different sources

| 来源     | 底物       | 最适 pH/<br>耐受 pH | pH 耐受<br>时间 | 最适温度/<br>耐受温度/°C | 高温耐受<br>时间   | 酶活/<br>(U·mL <sup>-1</sup> ) | 参考<br>文献 |
|--------|----------|-----------------|-------------|------------------|--------------|------------------------------|----------|
| 微小杆菌属  | 水杨苷      | 6-7/5.0~8.0     | 1 h         | 50~55/<50        | 1 h          | ND                           | [70]     |
| 枯草芽孢杆菌 | 水杨苷      | 6.5/4.0~7.5     | 24 h        | 60/40-65         | 1 h          | 4.9                          | [71]     |
| 酿酒酵母   | p-NPG    | 5.0/ND          | 10 min      | 50/ND            | 10 min       | 51.4                         | [72]     |
| 多粘芽孢杆菌 | p-NPG    | 7.0/ND          | 10 min      | 37/ND            | 10 min       | 24.7                         | [73]     |
| 木薯块根   | p-NPG    | 7.0/6.0~8.0     | 24 h        | 40/ND            | 48 h(73.01%) | 1.1                          | [74]     |
| 米曲霉    | 水杨素      | 4.5/4.0~6.0     | 1 h         | 55/30~50         | 1 h          | 40.8                         | [75]     |
| 大豆     | 大豆异黄酮糖苷  | 5.0/5.0~7.0     | 24 h        | 45/<40           | ND           | 2.2                          | [76]     |
| 芽枝霉菌   | 七叶苷      | 5.0/4.0~9.0     | ND          | ND/<60           | ND           | 7.2                          | [77]     |
| 毕赤酵母属  | p-NPG    | 5.0/ND          | 15 min      | 30/ND            | 72 h         | 276.1                        | [78]     |
| 黑曲霉    | 人参皂苷-Rg3 | 5.0/3.0~7.0     | 18 h        | 40/30~50         | ND           | ND                           | [79]     |
| 曲霉菌    | p-NPG    | 5.0/3.0~7.0     | 24 h        | 50/20~80         | 4 h          | 1 066.0                      | [80]     |

注:ND表示无。

## 2.5 甘露聚糖酶

甘露聚糖酶是一类能够水解β-1,4-甘露糖苷键的糖苷水解酶,主要降解植物细胞壁中的甘露聚糖类多糖(如半乳甘露聚糖、葡甘露聚糖)。这类多糖作为抗营养因子,通过增加食糜黏度、包裹营养物质(如蛋白质、淀粉)以及促进肠道微生物异常发酵来降低饲料或食品的消化利用率<sup>[81]</sup>。甘

露聚糖酶通过分解甘露聚糖长链为低聚糖或单糖,显著降低黏度、释放被包裹的营养物质,并减少后肠发酵产气,从而改善消化效率。在生物燃料生产中,甘露聚糖酶可作为辅助降解木质纤维素的原料,其应用不仅通过直接酶解抗营养因子发挥作用,还能优化整体消化环境,提升生产性能和食品品质。表7展示了不同来源甘露聚糖酶的功能特性。

表7 不同来源甘露聚糖酶的功能特性

Table 7 Functional characteristics of mannanases from different sources

| 来源              | 底物    | 最适 pH/<br>耐受 pH | pH 耐受<br>时间 | 最适温度/<br>耐受温度/°C | 高温耐<br>受时间 | 酶活/<br>(U·mL <sup>-1</sup> ) | 参考<br>文献 |
|-----------------|-------|-----------------|-------------|------------------|------------|------------------------------|----------|
| 重组嗜酸乳杆菌         | 甘露聚糖  | 5.5/5.0~7.0     | ND          | 55/50~60         | ND         | 353.0                        | [82]     |
| 枯草芽孢杆菌          | 刺槐豆胶  | 6.0/5.5~7.0     | ND          | 37/20~50         | ND         | 15 265.0                     | [83]     |
| 重组豆曲霉 AsT1      | 咖啡提取物 | 5.0/3.0~7.0     | ND          | 40/40~60         | ND         | 180.0                        | [84]     |
| 重组米曲霉 MTCC 1846 | 角豆粉   | 5.0/3.0~7.0     | 4 h         | 60/30~90         | ND         | 43.4                         | [85]     |
| 宇佐美曲霉           | 魔芋粉   | 5.0~8.0         | ND          | 31/25~34         | ND         | 3 362.0                      | [86]     |
| 地衣芽孢杆菌          | 角豆胶   | 5.0/4.0~6.0     | ND          | 60/50~65         | ND         | ND                           | [87]     |
| 枯草芽孢杆菌 SA-22    | 魔芋粉   | 6.5/5.0~10.0    | ND          | 70/50~70         | 4 h        | ND                           | [88]     |
| 芽孢杆菌 M50        | 魔芋粉   | 6.0/5.0~7.0     | 4 h         | 50/25~65         | 15 min     | 330.0                        | [89]     |
| 枯草芽孢杆菌 CY S4    | 魔芋胶   | 7.0/5.0~11.0    | 2 h         | 60/20~60         | 3 h        | 11.0                         | [90]     |
| 类芽孢杆菌 LLZ1      | 角豆胶   | 7.0             | ND          | 50/ND            | ND         | 39.1                         | [91]     |
| 地衣芽孢杆菌 HDYM-04  | 魔芋粉   | 8.0             | ND          | 37/ND            | ND         | 4 890.0                      | [92]     |
| 乳酸片球菌 M17       | 刺槐豆胶  | 6.0/2.0~9.0     | ND          | 60/30~80         | ND         | 78.7                         | [93]     |

注:ND表示无。

2.6 其他酶制剂在豆粕抗营养因子降解中的应用

此外,植酸酶、果胶酶、木聚糖酶等均可以在豆粕的酶解过程中发挥作用。植酸酶可以精准分解豆粕中的植酸,释放被束缚的磷、钙等矿物质,显著提升微量元素的生物利用率,尤其适用于磷需求高的畜禽饲料。果胶酶可以协同纤维素酶瓦解植物细胞壁中的果胶网络,促进细胞内蛋白质和油脂的溶出,同时降低食糜黏度,改善消化流动性。木聚糖酶可以靶向降解半纤维素中的木聚糖,破除纤维屏障,释放包埋的淀粉与蛋白质,尤其对豆粕加工副产物的降解效果显著。

3 酶制剂的科学选择

3.1 最适 pH 和温度的选择

在酶制剂的应用中,为了有效降低使用成本,生产者可以通过延长反应时间来相应减少酶的添加量。由于豆粕中粗蛋白含量较高,因此蛋白酶的需求量较大。基于这一策略,选择具有优良温度稳定性和 pH 稳定性的蛋白酶显得尤为重要。此类蛋白酶能够在较宽的温度和 pH 范围内保持较高的活性,从而确保在延长反应时间的情况下,酶解反应仍能高效进行,达到预期的降解效果同时最大程度地减少酶用量,降低生产成本。

进一步地,考虑到豆粕中存在两种主要的抗

营养蛋白——大豆球蛋白和β-伴大豆球蛋白,其氨基酸组成具有特定的统计特征(表3)。对这2种大分子蛋白进行氨基酸含量分析发现,其中疏水性氨基酸含量分别占43.38%和41.16%。疏水性蛋白酶因其独特的底物作用特性,对这两种抗营养蛋白的降解具有显著优势,其中疏水性蛋白酶能够有效地识别并作用于这些蛋白的疏水区域,从而更高效地将其水解为小肽和氨基酸。这一过程不仅降低了抗营养蛋白对动物消化吸收的负面影响,还显著提升了豆粕的营养价值。

纤维素酶的最适温度和 pH 选择需根据其来源、底物及具体应用场景进行优化。对于降解抗营养因子,如植物细胞壁中的纤维素和半纤维素,为了提高饲料的营养价值,通常选择较温和的条件。多数纤维素酶在 pH 4.0~ 6.0 范围内表现出较高活性,当纤维素酶反应环境中的 pH 发生改变时,纤维素酶的性质也会发生相应的改变,并且由于来源不同,对 pH 的适应程度也不同。在纤维素酶研究过程中,发现已报道的纤维素酶生产菌株大部分都是真菌,且在偏酸性环境中(pH 4.0~5.0)降解纤维素的作用显著提高<sup>[55]</sup>。赵龙妹等<sup>[94]</sup>探究巨大芽孢杆菌(*Bacillus megaterium de Bary*)所产纤维素酶的酶学特性,其最适反应温度为 50 °C。张智等<sup>[60]</sup>探究了地衣芽孢杆菌所产纤维素酶的酶学特性,其最适反应温度为 37 °C。综上,纤维素酶的最适温度因酶的来源和具体类型而异,

具体的最适温度还需根据酶的来源和底物进行优化。

$\alpha$ -半乳糖苷酶的最适温度和pH因来源不同而有所差异。一般最佳催化反应温度在30~70℃, pH在4.0~10.0, 条件范围较宽。Arekal等<sup>[43]</sup>报道的植物乳杆菌(*L. plantarum* MTCC5422)的最适温度为45℃, 最适pH为5.8。Yoon等<sup>[46]</sup>报道的弯曲乳杆菌(*L. curvatus* R08)最适温度为35~37℃, 最适pH为6.5~7.0, 表现最高的酶活力。Sinitsyna等<sup>[52]</sup>报道的青霉属真菌(*Penicillium canescens*)最适反应温度为65℃, 最适pH为5。这些差异表明, 根据 $\alpha$ -半乳糖苷酶的不同来源, 其最适反应条件显著不同, 因此在实际应用中需要根据具体的酶来源优化反应条件。

$\beta$ -葡萄糖苷酶的最适温度和pH因酶的来源不同而有所差异。一般而言, 其最适温度范围在40~70℃, 最适pH范围在4.0~8.0。例如, 某些来自嗜热微生物的 $\beta$ -葡萄糖苷酶具有较高的最适温度, 可达80℃左右<sup>[95]</sup>, 而一些来自中温微生物的酶最适温度则在25~50℃<sup>[96]</sup>。在pH方面, 多数 $\beta$ -葡萄糖苷酶在酸性至中性环境中表现出较高活性, 最适pH通常在4.5~6.5, 但也有部分酶在接近中性或稍碱性的pH条件下具有较高的活性。选择合适的 $\beta$ -葡萄糖苷酶及其反应条件时, 需根据具体的酶来源和应用场景进行优化, 以达到最佳的催化效果。

甘露聚糖酶的最适温度与pH选择需结合其来源及工艺需求。以GH26家族甘露聚糖酶(点斑嗜菌霉来源)为例, 其最适温度为55℃, 耐受温度高达80℃(15 min保留84%活性), 适合高温灭菌或快速反应的工业化流程; 最适pH为5.5, 耐受范围4.0~9.0, 适应发酵或预处理中的酸性至中性条件<sup>[97]</sup>。重组嗜酸乳杆菌来源的 $\beta$ -1,4-甘露聚糖酶为例, 其最适pH为5.5(耐受范围5.0~7.0), 最适温度为55℃(耐受50~60℃), 酶活达353 U·mL<sup>-1</sup>, 适合中性至弱酸性环境的中温工艺(如食品加工)<sup>[92]</sup>。枯草芽孢杆菌(CY-S4菌株)产生的 $\beta$ -甘露聚糖酶在pH 7.0(耐受5.0~11.0)和60℃(耐受20~60℃)下表现最佳, 且能耐受3 h高温, 适用于更广泛的pH和温度波动场景<sup>[83]</sup>。若需高温短时反应(如灭菌流程), 地衣芽孢杆菌(最适60℃, 耐受50~65℃)和芽孢杆菌M50(最适50℃, 耐受25~65℃)的酶更具优势, 尤其后者在15 min内保持高活性。

此外, *Pseudoscillus* sp. 和HDYM-04菌株的酶在pH 7.0~8.0和50℃左右下活性突出, 适合中性环境的长时间反应(如饲料添加剂生产)。综上, 选择时需匹配工艺的pH与温度, 并平衡酶活与稳定性以优化效率。

### 3.2 酶制剂来源和稳定性

酶制剂主要来源于微生物(如细菌、酵母和霉菌)、植物和动物组织。微生物来源的酶因其生产成本低、产量高且易于基因改造而被广泛应用。植物来源的酶特异性高但提取成本较高, 动物来源的酶活性高但来源有限且成本较高<sup>[98]</sup>。酶的稳定性涉及多个方面, 包括pH、温度、溶剂、离子强度、机械力和储存条件等。不同来源的酶在不同的pH和温度范围内表现出最佳活性, 且在不同溶剂中的稳定性不同。离子强度、机械力和储存条件也会影响酶的活性和稳定性<sup>[99-100]</sup>。因此, 在豆粕酶解加工过程中, 选择与豆粕天然pH相匹配的中性蛋白酶、中温稳定酶, 添加适量激活离子, 优化储存条件, 可提高酶解效率和经济效益。在实际应用中, 还需根据具体工艺条件进行实验验证和优化, 以实现最高的酶解效率和最低的成本。

### 3.3 其他

在豆粕酶解工艺中, 除了酶的来源、稳定性和最适反应条件外, 安全性、工艺复杂性和成本效益也是酶制剂选择和应用中不可忽视的重要因素。安全性方面, 酶制剂通常来源于微生物、植物或动物, 需确保来源可靠、纯度高且无过敏性, 微生物来源的酶需经过严格筛选和鉴定, 以避免产生毒素等有害物质<sup>[101]</sup>。工艺复杂性上, 酶解反应需精确控制温度、pH等参数, 多步反应后处理步骤虽能提高产品质量, 但增加了工艺的复杂性和成本。对于成本效益方面, 微生物来源的酶生产成本低, 通过优化反应条件可减少酶用量和生产成本, 延长反应时间虽能减少酶用量但会增加生产周期和设备成本, 需找到平衡。此外, 有效利用酶解过程中产生的副产物也能增加工艺的经济性。综上所述, 选择合适的酶制剂需要在安全性、工艺复杂性和成本效益之间进行权衡, 通过科学合理的选择和优化, 可以显著提高豆粕酶解工艺的效率和经济性, 为饲料工业和动物生产提供有力支持。

## 4 酶制剂与酶解豆粕工艺优化

饲用酶制剂不仅能提高饲料利用率、拓宽饲料原料的范围、节约饲料和养殖成本,且由于具有不产生残留、无毒副作用、节能环保等优点,使其必然会在实现畜牧业的可持续发展战略中有着极为广阔的应用前景。目前,饲用酶制剂的作用效果已得到广泛认可。酶作为一种蛋白质,对湿度、酸、碱等理化条件及其作用底物极为敏感,其在畜禽日粮中的作用效果会受到酶的种类、来源及酶学特性等因素的影响。同时,作为饲料添加剂,饲用酶作用效果还会受到日粮底物环境[类型、饲料加工工艺(高温、高湿、物理挤压)、畜禽种类、年龄阶段及消化道内环境温度、pH、内源蛋白酶]等多种因素的影响<sup>[102]</sup>。

在酶解豆粕的工艺优化过程中,酶制剂的选择需要综合考虑多方面因素。豆粕作为一种重要的植物蛋白原料,其营养价值往往受到多种抗营养因子的限制。这些抗营养因子不仅会影响动物的消化吸收,还可能引发不良生理反应。因此,如何通过酶解工艺有效降低这些抗营养因子的负面影响,同时保留或增强豆粕的营养价值,成为工艺优化的关键所在。从实际应用的角度来看,酶制剂的选择首先要着眼于其对特定抗营养因子的降解效果。

在降解抗营养因子的基础上,还可以通过功能性酶制剂释放活性功能物质来提升豆粕的营养价值。在适当的酶解条件下,豆粕中的大分子蛋白质可以被分解成更易吸收的小肽和氨基酸,同时一些功能性成分,如大豆异黄酮的活性形式,也能被有效释放出来<sup>[103]</sup>。特别是 $\beta$ -葡萄糖苷酶的靶向作用,将糖苷型异黄酮转化为高活性苷元,释放营养成分,从而增强抗氧化、抗炎和免疫调节功能,优化肠道健康,修复屏障功能,平衡免疫应答,同时降低饲料成本,减少环境负担,实现多方面的协同提升<sup>[104]</sup>。蛋白酶通过水解豆粕蛋白生成具有抗氧化和免疫调节功能的小分子肽<sup>[105]</sup>, Heng等<sup>[106]</sup>研究表明,添加蛋白酶提高了发酵的蛋白酶活性,促进了微生物的生长和淀粉酶的分泌,加速了还原糖的生产和利用,并增加了有机酸含量。Ketaren等<sup>[107]</sup>研究表明,使用植酸酶可将植酸磷转化率提升至70%,并将磷的生物学利用率提高了

527.27%,不仅提高了矿物质生物利用率,还能解除植酸对消化酶的抑制作用。

综上所述,通过合理选择酶制剂并优化酶解工艺,不仅可以有效降解豆粕中的抗营养因子,还能释放多种活性功能物质,提升豆粕的营养价值,为动物健康和生产性能带来显著益处。

## 5 展望

本文综述了豆粕酶解工艺中常用酶制剂的种类、作用机制、酶解条件及其对豆粕营养价值的提升效果。蛋白酶、纤维素酶、半乳糖苷酶等酶制剂能有效降解豆粕中的抗营养因子,提高其消化率和利用率。选择合适的酶制剂并优化工艺条件,可显著改善豆粕营养价值,推动其在饲料和食品工业中的高效应用。

### 参 考 文 献

- [1] ADACHI M, KANAMORI J, MASUDA T, *et al.* Crystal structure of soybean 11S globulin: glycinin A3B4 homohexamer[J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.*, 2003, 100(12): 7395-7400.
- [2] 杨玉娟,姚怡莎,秦玉昌,等. 豆粕与发酵豆粕中主要抗营养因子调查分析[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(3): 573-580.
- [3] YANG Y J, YAO Y S, QIN Y C, *et al.* Investigation and analysis of main AFN in soybean meal and fermented soybean meal[J]. *Sci. Agric. Sin.*, 2016, 49(3): 573-580.
- [4] MARUYAMA N, ADACHI M, TAKAHASHI K, *et al.* Crystal structures of recombinant and native soybean  $\beta$ -conglycinin  $\beta$  homotrimers[J]. *Eur. J. Biochem.*, 2001, 268(12): 3595-3604.
- [5] 王蕾,王雅馨,石亚伟. 植物多肽类胰蛋白酶抑制剂降糖功效研究进展[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(22): 406-412.
- [6] WANG L, WANG Y X, SHI Y W. Recent progress in hypoglycemic effect of plant protein trypsin inhibitors[J]. *Sci. Technol. Food Ind.*, 2021, 42(22): 406-412.
- [7] LIENER I E. Implications of antinutritional components in soybean foods[J]. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, 1994, 34(1): 31-67.
- [8] SIRTORI C R, LOVATI M R. Soy proteins and cardiovascular disease[J]. *Curr. Atheroscler. Rep.*, 2001, 3(1): 47-53.
- [9] MURDOCK L L, SHADE R E. Lectins and protease inhibitors as plant defenses against insects[J]. *J. Agric. Food Chem.*, 2002, 50(22): 6605-6611.
- [10] OKEDIGBA A O, ROSSO M L, YU D, *et al.* Comparative binding affinity analysis of soybean meal Bowman-Birk and Kunitz trypsin inhibitors in interactions with animal serine proteases[J]. *ACS Food Sci. Technol.*, 2023, 3(8): 1344-1352.
- [11] 张良慧. 发酵豆粕在雏鸡日粮中应用的研究[D]. 新乡: 河南科技学院, 2022.
- [12] PAN L, ZHAO Y, YUAN Z, *et al.* The integrins involved in soybean agglutinin-induced cell cycle alterations in IPEC-J2[J]. *Mol. Cells*, 2017, 40(2): 109-116.

- [11] ZHAO Y, QIN G, SUN Z, *et al.* Effects of soybean agglutinin on intestinal barrier permeability and tight junction protein expression in weaned piglets[J]. *Int. J. Mol. Sci.*, 2011, 12(12): 8502-8512.
- [12] LI F, XIE Y, GAO X, *et al.* Screening of cellulose degradation bacteria from Min pigs and optimization of its cellulase production[J]. *Electron. J. Biotechnol.*, 2020, 48: 29-35.
- [13] DASKIRAN M, TEETER R G, FODGE D, *et al.* An evaluation of endo- $\beta$ -D-mannanase (Hemicell) effects on broiler performance and energy use in diets varying in  $\beta$ -mannan content 1[J]. *Poult. Sci.*, 2004, 83(4): 662-668.
- [14] RITZ C W, HULET R M, SELF B B, *et al.* Growth and intestinal morphology of male turkeys as influenced by dietary supplementation of amylase and xylanase[J]. *Poult. Sci.*, 1995, 74(8): 1329-1334.
- [15] SALEEM R, SHAH S Z H, FATIMA M, *et al.* Use of dietary  $\beta$ -mannanase supplementation to increase nutrient digestibility and improve growth of juvenile rohu (*Labeo rohita*) given a feed based on plant ingredients[J]. *Aquac. Int.*, 2023, 31(3): 1789-1804.
- [16] 齐德生. 饲用酶制剂发展概述[J]. *饲料工业*, 2011, 32(12): 29-31.  
QI D S. Overview of the development of feed enzyme preparation[J]. *Feed. Ind.*, 2011, 32(12): 29-31.
- [17] BARRETT A J, TOLLE D P, RAWLINGS N D. Managing peptidases in the genomic era[J]. *Biol. Chem.*, 2003, 384(6): 873-882.
- [18] 潘丽洁,王斌,潘力. 胰凝乳蛋白酶 SplB 在枯草芽孢杆菌中的重组表达及应用[J]. *食品科学*, 2023, 44(2): 181-188.  
PAN L J, WANG B, PAN L. Recombinant expression and application of chymotrypsin SplB in *Bacillus subtilis*[J]. *Food Sci.*, 2023, 44(2): 181-188.
- [19] 李辉. 日本鳎胰蛋白酶、胰凝乳蛋白酶的分离纯化及性质分析[D]. 厦门:集美大学, 2015.
- [20] 钱方,邓岩,王凤翼,等. 碱性内切蛋白酶水解大豆蛋白的研究[J]. *大连轻工业学院学报*, 2000, 19(1): 40-44.  
QIAN F, DENG Y, WANG F Y, *et al.* Hydrolysis of soybean protein by basin endo protease Alcalase[J]. *J. Dalian Inst. Light Ind.*, 2000, 19(1): 40-44.
- [21] 吴建中,赵谋明,宁正祥,等. 酶法水解生产大豆多肽研究[J]. *粮油加工与食品机械*, 2003(1): 45-47.  
WU J Z, ZHAO M M, NING Z X, *et al.* Study on soybean peptides produced by enzymatic hydrolysis[J]. *Mach. Cereals Oil Food Process.*, 2003(1): 45-47.
- [22] 宋涵玉. 弹性蛋白酶在黑曲霉中的表达及促溶蛋白标签的筛选[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2022.
- [23] 傅明亮,刘晓杰,刘婧,等. 地衣芽孢杆菌弹性蛋白酶纯化和性质研究[J]. *食品科学*, 2011, 32(7): 216-219.  
FU M L, LIU X J, LIU J, *et al.* Purification and characteristics of elastase produced by *Bacillus licheniformis*[J]. *Food Sci.*, 2011, 32(7): 216-219.
- [24] 樊陈,王茂广,高兆建,等. 产低温弹性蛋白酶菌株的高效诱变及酶学特性[J]. *食品科学*, 2013, 34(19): 190-194.  
FAN C, WANG M G, GAO Z J, *et al.* Highly efficient mutation of *Bacillus brevis* to obtain cold-active elastase-producing strain and enzymatic characterization[J]. *Food Sci.*, 2013, 34(19): 190-194.
- [25] 谷新晰,许文涛,黄昆仑,等. 重组弹性蛋白酶诱导表达、纯化及酶学特性研究[J]. *食品科学*, 2009, 30(19): 227-231.  
GU X X, XU W T, HUANG K L, *et al.* Expression, purification and enzymological properties of recombinant elastase[J]. *Food Sci.*, 2009, 30(19): 227-231.
- [26] 牛树壹. 枯草杆菌蛋白酶的分离纯化、酶学性质及体外溶栓性质[D]. 青岛:中国海洋大学, 2014.
- [27] LARSEN A N, MOE E, HELLAND R, *et al.* Characterization of a recombinantly expressed proteinase K-like enzyme from a psychrotrophic *Serratia* sp.[J]. *FEBS J.*, 2006, 273(1): 47-60.
- [28] SAKAGUCHI M, TAKEZAWA M, NAKAZAWA R, *et al.* Role of disulphide bonds in a thermophilic serine protease aqualysin I from *Thermus aquaticus* YT-1[J]. *J. Biochem.*, 2008, 143(5): 625-632.
- [29] 杨子璇. 蛋白酶 K 在毕赤酵母中的异源表达及应用初探[D]. 天津:天津科技大学, 2023.
- [30] 轩小然. 嗜热蛋白酶 Tth0724 的枯草杆菌表达及其应用[D]. 长春:吉林大学, 2022.
- [31] 赵玥. 胃蛋白酶活力和热稳定性理性设计研究[D]. 上海:华东师范大学, 2021.
- [32] 王芬,陈飞飞,高为芳,等. 小分子封闭提高固定化嗜热菌蛋白酶的热稳定性[J]. *生物加工过程*, 2013, 11(6): 47-52.  
WANG F, CHEN F F, GAO W F, *et al.* Enhancement of thermal stability of immobilized thermolysin using end-group blocking[J]. *Chin. J. Bioprocess Eng.*, 2013, 11(6): 47-52.
- [33] 应长青,洪心,李旭颖,等. 产蛋白酶嗜热菌 *Anoxybacillus* sp. 紫外诱变研究[J]. *哈尔滨医科大学学报*, 2015, 49(5): 385-388.  
YING C Q, HONG X, LI X Y, *et al.* Research on UV mutagenesis of protease-producing strain of thermophilus *Anoxybacillus* sp.[J]. *J. Harbin Med. Univ.*, 2015, 49(5): 385-388.
- [34] 崔昱清,王复龙,崔保威,等. 牛胰脏组织蛋白酶 L 的纯化和酶学性质[J]. *食品科学*, 2015, 36(15): 142-146.  
CUI Y Q, WANG F L, CUI B W, *et al.* Purification and characterization of cathepsin L from bovine pancreas[J]. *Food Sci.*, 2015, 36(15): 142-146.
- [35] 颜龙杰,沈建东,张凌晶,等. 凡纳滨对虾组织蛋白酶 L 性质分析及其对肌肉蛋白的降解[J]. *食品科学*, 2017, 38(22): 34-40.  
YAN L J, SHEN J D, ZHANG L J, *et al.* Characterization of cathepsin L from *Litopenaeus vannamei* and its effect on muscular protein degradation[J]. *Food Sci.*, 2017, 38(22): 34-40.
- [36] 李妍钰. 红鳍东方鲀组织蛋白酶 B、L 的异源表达及粗酶液性质研究[D]. 上海:上海海洋大学, 2017.
- [37] YSUNG H, CHEN H J, LIU T Y, *et al.* Improvement of the functionality of soy protein by introduction of new thiol groups through a papain-catalyzed acylation[J]. *J. Food Sci.*, 1983, 48(3): 708-711.
- [38] 梁杰,林国荣,周凤超,等. 纳米磁球固定化木瓜蛋白酶的制备及酶学性质研究[J]. *食品与发酵工业*, 2024, 50(8): 161-168.  
LIANG J, LIN G R, ZHOU F C, *et al.* Preparation and enzymatic properties of papain immobilized by nano-magnetic spheres[J]. *Food Ferment. Ind.*, 2024, 50(8): 161-168.
- [39] 张佳佳. 饲用  $\alpha$ -半乳糖苷酶固体扩大培养及其应用研究[D].

- 杭州:浙江大学,2010.
- [40] ANISHA G S. Biopharmaceutical applications of  $\alpha$ -galactosidases[J]. Biotechnol. Appl. Biochem., 2023, 70(1): 257-267.
  - [41] VETRISSELVI P M, NARASIMHAN M K, SAMUEL M, et al.. Biodegradation of sugarcane bagasse biomass using recombinant alpha-galactosidase overexpressing whole-cell *E. coli*: a sustainable method of agricultural waste utilization[J/OL]. 3 Biotech, 2024, 14(10): 246[2025-07-18]. <https://doi.org/10.1007/s13205-024-04092-6>.
  - [42] 魏淑英,陈艳. $\alpha$ -半乳糖苷酶在豆粕型日粮中的应用[J]. 饲料博览,2008(5):8-11.  
WEI S Y, CHEN Y. Application of  $\alpha$ -galactosidase in soybean meal diet[J]. Feed. Rev., 2008(5): 8-11.
  - [43] ROOPASHRI A N, VARADARAJ M C. Hydrolysis of flatulence causing oligosaccharides by  $\alpha$ -d-galactosidase of a probiotic *Lactobacillus plantarum* MTCC5422 in selected legume flours and elaboration of probiotic attributes in soy-based fermented product[J]. Eur. Food Res. Technol., 2014, 239(1): 99-115.
  - [44] WANG C, WANG H, MA R, et al.. Biochemical characterization of a novel thermophilic  $\alpha$ -galactosidase from *Talaromyces leycettanus* JCM12802 with significant transglycosylation activity[J]. J. Biosci. Bioeng., 2016, 121(1): 7-12.
  - [45] 刁文涛,向凌云,宁萌,等. $\alpha$ -半乳糖苷酶基因在大肠杆菌中的表达及酶学性质研究[J]. 中国酿造,2019,38(8):60-66.  
DIAO W T, XIANG L Y, NING M, et al.. Expression and enzymatic properties of  $\alpha$ -galactosidase gene in *Escherichia coli*[J]. China Brew., 2019, 38(8): 60-66.
  - [46] YOON M Y, HWANG H J. Reduction of soybean oligosaccharides and properties of  $\alpha$ -D-galactosidase from *Lactobacillus curvatus* R08 and *Leuconostoc mesenteroides* JK55[J]. Food Microbiol., 2008, 25(6): 815-823.
  - [47] WANG H, SHI P, LUO H, et al.. A thermophilic  $\alpha$ -galactosidase from *Neosartorya fischeri* P1 with high specific activity, broad substrate specificity and significant hydrolysis ability of soymilk[J]. Bioresour. Technol., 2014, 153: 361-364.
  - [48] 许尧兴,李艳丽,柳永,等.黑曲霉变种RM48  $\alpha$ -半乳糖苷酶的分离纯化及其酶学性质研究[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版),2009,35(2):147-152.  
XU Y X, LI Y L, LIU Y, et al.. Purification and characterization of  $\alpha$ -galactosidase from *Aspergillus niger* v. Tiegh RM48[J]. J. Zhejiang Univ. Agric. Life Sci., 2009, 35(2): 147-152.
  - [49] CAVAZZONI V, ADAMI A, CRAVERI R.  $\alpha$ -galactosidase from the yeast *Candida javanica*[J]. Appl. Microbiol. Biotechnol., 1987, 26(6): 555-559.
  - [50] WANG H, LUO H, LI J, et al.. An  $\alpha$ -galactosidase from an acidophilic *Bispora* sp. MEY-1 strain acts synergistically with  $\beta$ -mannanase[J]. Bioresour. Technol., 2010, 101(21): 8376-8382.
  - [51] 贡培培. $\alpha$ -半乳糖苷酶高产菌株的筛选及其基因的克隆、表达、纯化和性质研究[D]. 南京:南京农业大学,2011.
  - [52] SINITSYNA O A, FEDOROVA E A, VAKAR I M, et al.. Isolation and characterization of extracellular  $\alpha$ -galactosidases from *Penicillium canescens*[J]. Biochem. Mosc., 2008, 73(1): 97-106.
  - [53] HKO C, HTSAI C, LIN P H, et al.. Characterization and pulp refining activity of a *Paenibacillus campinasensis* cellulase expressed in *Escherichia coli*[J]. Bioresour. Technol., 2010, 101(20): 7882-7888.
  - [54] 张清翠,石雅丽,刘安礼,等.外切纤维素酶的研究与应用进展[J]. 生物技术进展,2020,10(5):495-502.  
ZHANG Q C, SHI Y L, LIU A L, et al.. Research and application progress of exocellulase[J]. Curr. Biotechnol., 2020, 10(5): 495-502.
  - [55] 柴秀娟.高产纤维素酶菌株的筛选、酶学性质及发酵工艺的研究[D]. 新疆石河子:石河子大学,2015.
  - [56] 黄忠永.纤维素酶的研究现状及其在畜牧生产中的应用[J]. 当代畜禽养殖业,2018(10):10.  
HUANG Z Y. Research status of cellulase and its application in animal husbandry production[J]. Mod. Anim. Husband., 2018 (10): 10.
  - [57] 刘建民,连梦思,彭洁.一株产纤维素酶和木聚糖酶真菌的鉴定及产酶条件优化[J]. 基因组学与应用生物学,2025, 44(2):182-191.  
LIU J M, LIAN M S, PENG J. Identification of a fungus producing cellulase and xylanase and optimization of enzyme production conditions[J]. Genom. Appl. Biol., 2025, 44(2): 182-191.
  - [58] 王瑾,白静,赵晶,等.新型GH45家族纤维素酶的智能挖掘及其在里氏木霉中的高效表达[J]. 生物技术进展,2025,15(2): 287-295.  
WANG J, BAI J, ZHAO J, et al.. Intelligent mining of novel GH45 cellulases and its efficient expression in *Trichoderma reesei*[J]. Curr. Biotechnol., 2025, 15(2): 287-295.
  - [59] 吴诗丽,谢莹莹,段雪凝,等.产纤维素酶菌株的筛选及其酶学性质研究[J/OL]. 食品工业科技:1-14[2025-04-23]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024080165>.  
WU S L, XIE Y Y, DUAN X N, et al. Screening of cellulase-producing strains and study on their enzymatic properties[J/OL]. Sci. Technol. Food Ind.: 1-14[2025-04-23]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024080165>.
  - [60] 张智,王蒙爱,冯丽荣,等.纤维素酶产生菌的筛选及功能菌NF-101的全基因分析与产酶工艺优化[J]. 现代食品科技, 2024,40(11):107-118.  
ZHANG Z, WANG M A, FENG L R, et al.. Screening of cellulase-producing bacteria, whole-gene analysis, and optimization of the enzyme production process for the functional bacterium NF-101[J]. Mod. Food Sci. Technol., 2024, 40(11): 107-118.
  - [61] 冉光耀,唐佳代,赵益梅,等.一株产纤维素酶酵母菌的筛选、鉴定及产酶条件优化[J]. 中国酿造,2024,43(9):72-78.  
RAN G Y, TANG J D, ZHAO Y M, et al.. Screening, identification and enzyme production conditions optimization of a cellulase-producing yeast[J]. China Brew., 2024, 43(9): 72-78.
  - [62] 王彩衣,夏靖雯,庞冰瑜,等.高产纤维素酶菌株的筛选、固态发酵条件优化及其酶学性质研究[J]. 中国酿造,2024, 43(9):105-111.  
WANG C Y, XIA J W, PANG B Y, et al.. Screening and optimization of solid-state fermentation conditions of high cellulase-producing strain and its enzymatic property[J]. China Brew., 2024, 43(9): 105-111.
  - [63] 孔蒙蒙,金静静,卢鹏,等.高产纤维素酶工程菌株产酶条件优化[J]. 生物技术进展,2024,14(6):1032-1041.

- KONG M M, JIN J J, LU P, *et al.*. Optimization of enzyme production conditions of high-yielding cellulase engineering strains[J]. *Curr. Biotechnol.*, 2024, 14(6): 1032-1041.
- [64] 范嘉慧,王志,任俊达,等. 2株真菌混合发酵高产纤维素酶条件优化[J]. *中国酿造*, 2024, 43(6): 239-244.
- FAN J H, WANG Z, REN J D, *et al.*. Optimization of conditions for high-yield cellulase by 2 fungal strains mixed fermentation[J]. *China Brew.*, 2024, 43(6): 239-244.
- [65] 单冬冬,赵柔,黄婷,等. 一株纤维素酶产生菌的筛选与产酶条件优化[J]. *现代农业科技*, 2024(17): 125-128.
- SHAN D D, ZHAO R, HUANG T, *et al.*. Screening of a cellulase-producing strain and optimization of enzymatic production conditions[J]. *Mod. Agric. Sci. Technol.*, 2024(17): 125-128.
- [66] 国立东,王永春,于纯森,等. 一株高产纤维素酶的解淀粉芽孢杆菌分离及产酶条件优化[J]. *中国食品添加剂*, 2020, 31(7): 53-60.
- GUO L D, WANG Y C, YU C M, *et al.*. Isolation of a high yield cellulase *Bacillus amyloliquefaciens* strain and its enzyme production optimization[J]. *China Food Addit.*, 2020, 31(7): 53-60.
- [67] 韦燕琪,宁思敏,韦昌浩,等. 高产纤维素酶产生菌的筛选、鉴定及发酵条件优化[J]. *中国饲料*, 2024(17): 46-54.
- WEI Y Q, NING S M, WEI C H, *et al.*. Screening and identification of cellulase-producing strain and optimization of the fermentation conditions[J]. *China Feed.*, 2024(17): 46-54.
- [68] 王昊宇.  $\beta$ -葡萄糖苷酶的研究及应用[J]. *中国高新区*, 2018(14): 215.
- WANG H Y. Research and application of  $\beta$ -glucosidase[J]. *Sci. Technol. Ind. Parks*, 2018(14): 215.
- [69] 姜婷婷,王奕丁,王全,等. 产 $\beta$ -葡萄糖苷酶芽孢杆菌降解豆粕的发酵条件优化及抗营养因子测定[J]. *饲料工业*, 2017, 38(14): 52-55.
- JIANG T T, WANG Y D, WANG Q, *et al.*. Optimization of fermentation conditions and anti-nutritional factors for soybean meal degradation by *Bacillus*  $\beta$ -glucosidase[J]. *Feed. Ind.*, 2017, 38(14): 52-55.
- [70] 黄琴,朱婷,蒋承建,等. 产 $\beta$ -葡萄糖苷酶的菌种的筛选、鉴定及其酶学特性[J]. *基因组学与应用生物学*, 2011, 30(5): 590-595.
- HUANG Q, ZHU T, JIANG C J, *et al.*. Isolation, identification and the enzymatic characteristics of the strain producing  $\beta$ -glucosidase[J]. *Genom. Appl. Biol.*, 2011, 30(5): 590-595.
- [71] 覃宝山,何海燕,李燕婷,等.  $\beta$ -葡萄糖苷酶产生菌的筛选鉴定及其粗酶液酶学性质研究[J]. *中国酿造*, 2024, 43(8): 128-132.
- QIN B S, HE H Y, LI Y T, *et al.*. Screening and identification of  $\beta$ -glucosidase-producing strain and enzymatic properties of crude enzyme[J]. *China Brew.*, 2024, 43(8): 128-132.
- [72] 侯晓瑞,王婧,杨学山,等. 甘肃河西走廊葡萄酒产区高产 $\beta$ -葡萄糖苷酶酵母菌株筛选[J]. *食品科学*, 2014, 35(23): 139-143.
- HOU X R, WANG J, YANG X S, *et al.*. Screening of yeast strains producing  $\beta$ -glucosidase from Hexi Corridor wine-producing regions of Gansu Province[J]. *Food Sci.*, 2014, 35(23): 139-143.
- [73] 赵云,刘伟丰,毛爱军,等. 多粘芽孢杆菌 (*Bacillus polymyxa*)  $\beta$ -葡萄糖苷酶基因在大肠杆菌中的表达、纯化及酶学性质分析[J]. *生物工程学报*, 2004, 20(5): 741-744.
- ZHAO Y, LIU W F, MAO A J, *et al.*. Expression, purification and enzymatic characterization of *Bacillus polymyxa*  $\beta$ -glucosidase gene (*bglA*) in *Escherichia coli*[J]. *Chin. J. Biotechnol.*, 2004, 20(5): 741-744.
- [74] 常祥祥,田永莉,颜娟,等. 木薯块根中 $\beta$ -葡萄糖苷酶的分离纯化及酶学性质[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(3): 141-147.
- CHANG X X, TIAN Y L, YAN J, *et al.*. Isolation, purification and characterization of  $\beta$ -glucosidase from cassava roots[J]. *Sci. Technol. Food Ind.*, 2023, 44(3): 141-147.
- [75] 陈静,郝伟伟,王春梅,等. 产 $\beta$ -葡萄糖苷酶真菌的筛选鉴定、纯化及酶学性质分析[J]. *食品科学*, 2013, 34(5): 191-196.
- CHEN J, HAO W W, WANG C M, *et al.*. Screening and identification of  $\beta$ -glucosidase-producing fungi, and purification and enzymatic analysis[J]. *Food Sci.*, 2013, 34(5): 191-196.
- [76] 孙艳梅,张永忠,王伊强,等. 大豆 $\beta$ -葡萄糖苷酶水解大豆异黄酮糖苷的研究[J]. *中国粮油学报*, 2006, 21(2): 86-89.
- SUN Y M, ZHANG Y Z, WANG Y Q, *et al.*. Hydrolysis of soybean isoflavone glucosides by  $\beta$ -glucosidases from soybean[J]. *J. Chin. Cereals Oils Assoc.*, 2006, 21(2): 86-89.
- [77] 覃拥灵,何海燕,刘园园,等. 产 $\beta$ -葡萄糖苷酶野生真菌的筛选鉴定及酶学性质研究[J]. *中国酿造*, 2012, 31(3): 53-57.
- QIN Y L, HE H Y, LIU Y Y, *et al.*. Screening and identification of a wild  $\beta$ -glucosidase producing fungal and its enzymatic property[J]. *China Brew.*, 2012, 31(3): 53-57.
- [78] 张敏,李佳益,倪永清,等. 产 $\beta$ -葡萄糖苷酶非酿酒酵母的筛选及酶学特性研究[J]. *中国酿造*, 2016, 35(5): 97-101.
- ZHANG M, LI J Y, NI Y Q, *et al.*. Screening of  $\beta$ -glucosidase-producing non-*Saccharomyces* yeasts with its enzymatic characteristics[J]. *China Brew.*, 2016, 35(5): 97-101.
- [79] 张丹,刘耀平,鱼红闪,等. 人参皂苷 $\beta$ -葡萄糖苷酶的分离纯化及其酶学特性[J]. *应用与环境生物学报*, 2003, 9(3): 259-262.
- ZHANG D, LIU Y P, YU H S, *et al.*. Purification of ginsenoside- $\beta$ -glucoside hydrolase and its characteristics[J]. *Chin. J. Appl. Environ. Biol.*, 2003, 9(3): 259-262.
- [80] RIOU C, SALMON J M, VALLIER M J, *et al.*. Purification, characterization, and substrate specificity of a novel highly glucose-tolerant beta-glucosidase from *Aspergillus oryzae*[J]. *Appl. Environ. Microbiol.*, 1998, 64(10): 3607-3614.
- [81] WANG X Y, ZHI L D, ZHANG Z S, *et al.*. Application of two crucial hemicellulolytic enzymes in fish diet: xylanase and mannanase[J/OL]. *Anim. Feed. Sci. Technol.*, 2025, 319: 116178 [2025-07-18]. <https://doi.org/10.1016/j.anifeeds.2024.116178>.
- [82] 顾斌涛,郭建军,曾静,等. 嗜酸乳杆菌表达载体的构建及其甘露聚糖酶的表达[J]. *中国酿造*, 2024, 43(1): 136-140.
- GU B T, GUO J J, ZENG J, *et al.*. Construction of *Lactobacillus acidophilus* expression vector and expression of mannanase[J]. *China Brew.*, 2024, 43(1): 136-140.
- [83] 李传峥,白龙,高畅,等. *B. amyloliquefaciens* T12 高产 $\beta$ -甘露聚糖酶发酵优化及降解产物益生元活性研究[J]. *现代畜牧兽医*, 2024(5): 23-30.
- LI C Z, BAI L, GAO C, *et al.*. Fermentation optimization of

- high-yield  $\beta$ -mannanase from *B. amyloliquefaciens* T12 and prebiotic activity of degradation product[J]. Mod. J. Anim. Husb. Vet. Med., 2024(5): 23-30.
- [84] ERKAN S B, BASMAK S, OZCAN A, *et al.* Mannooligosaccharide production by  $\beta$ -mannanase enzyme application from coffee extract[J/OL]. J. Food Process. Preserv., 2021, 45(8): e14668[2025-07-17]. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14668>.
- [85] JANA U K, SURYAWANSHI R K, PRAJAPATI B P, *et al.* Production optimization and characterization of mannooligosaccharide generating  $\beta$ -mannanase from *Aspergillus oryzae*[J]. Bioresour. Technol., 2018, 268: 308-314.
- [86] 李剑芳, 邬敏辰, 夏文水.  $\beta$ -甘露聚糖酶高产菌株选育及产酶条件的研究[J]. 食品与发酵工业, 2005, 31(9): 9-13.
- LI J F, WU M C, XIA W S. Breeding of acidic  $\beta$ -mannanase overproducing strain and studies on its enzyme production conditions[J]. Food Ferment. Ind., 2005, 31(9): 9-13.
- [87] 刘朝辉, 武伟娜, 刘跃, 等. 保护剂提高  $\beta$ -甘露聚糖酶热稳定性的研究[J]. 天津大学学报, 2008, 41(1): 114-118.
- LIU Z H, WU W N, LIU Y, *et al.* Enhancing the thermostability of  $\beta$ -mannanase by protective additives[J]. J. Tianjin Univ., 2008, 41(1): 114-118.
- [88] YU H Y, SUN Y M, WANG W J, *et al.* Purification and properties of *Bacillus subtilis* SA-22 endo-1, 4- $\beta$ -D-mannanase[J]. Chin. J. Biotechnol., 2003, 19(3): 327-331.
- [89] 陈一平, 龙健儿, 廖连华, 等. 芽孢杆菌  $M_{30}$  产生  $\beta$  甘露聚糖酶的条件研究[J]. 微生物学报, 2000, 40(1): 62-68.
- CHEN Y P, LONG J E, LIAO L H, *et al.* Study on the production of  $\beta$ MANNANASE by *Bacillus*  $M_{30}$ [J]. Acta Microbiol. Sin., 2000, 40(1): 62-68.
- [90] 李长影, 孔雯, 王家昕, 等.  $\beta$ -甘露聚糖酶产生菌的分离鉴定和酶学性质[J]. 华中农业大学学报, 2011, 30(2): 138-142.
- LI C Y, KONG W, WANG J X, *et al.* Isolation, identification and enzymatic characterization of  $\beta$ -mannanase producing strain[J]. J. Huazhong Agric. Univ., 2011, 30(2): 138-142.
- [91] ZHOU T, JU X, YAN L, *et al.* Production of mannooligosaccharides from orange peel waste with  $\beta$ -mannanase expressed in *Trichosporonoides oedocephalis*[J/OL]. Bioresour. Technol., 2024, 395: 130373[2025-07-18]. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.130373>.
- [92] 葛菁萍, 赵丹, 宋刚, 等.  $\beta$ -甘露聚糖酶产生菌 HDYM-04 的分离鉴定及产酶条件优化[J]. 食品科学, 2009, 30(21): 262-266.
- GE J P, ZHAO D, SONG G, *et al.* Isolation and identification of beta-mannanase producing strain HDYM-04 and optimization of fermentation conditions[J]. Food Sci., 2009, 30(21): 262-266.
- [93] NADAROGLU H, ADIGUZEL G, ADIGUZEL A, *et al.* A thermostable endo- $\beta$ -(1, 4)-mannanase from *Pediococcus acidilactici* (M17): purification, characterization and its application in fruit juice clarification[J]. Eur. Food Res. Technol., 2017, 243(2): 193-201.
- [94] 赵龙妹, 陈林, 杜东晓, 等. 产纤维素酶细菌的筛选鉴定与特性分析[J]. 中国农学通报, 2021, 37(30): 83-88.
- ZHAO L M, CHEN L, DU D X, *et al.* Screening, identification and characteristic analysis of cellulase-producing bacteria[J]. Chin. Agric. Sci. Bull., 2021, 37(30): 83-88.
- [95] HUANG C H, HUANG T L, LIU Y C, *et al.* Overexpression of a multifunctional  $\beta$ -glucosidase gene from thermophilic archaeon *Sulfolobus solfataricus* in transgenic tobacco could facilitate glucose release and its use as a reporter[J]. Transgenic. Res., 2020, 29(5-6): 511-527.
- [96] 李晨辉. 产  $\beta$ -葡萄糖苷酶菌株的筛选鉴定及亚麻籽饼粕脱毒工艺的研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
- [97] ZHU M, ZHANG L, YANG F, *et al.* A recombinant  $\beta$ -mannanase from *Thermoanaerobacterium aotearoense* SCUT27: biochemical characterization and its thermostability improvement[J]. J. Agric. Food Chem., 2020, 68(3): 818-825.
- [98] 胡学智, 王俊. 蛋白酶生产和应用的进展[J]. 工业微生物, 2008, 38(4): 49-61.
- HU X Z, WANG J. Advances in protease production and its applications[J]. Ind. Microbiol., 2008, 38(4): 49-61.
- [99] ZHOU X, SUN R, ZHAO J, *et al.* Enzymatic activity and stability of soybean oil body emulsions recovered under neutral and alkaline conditions: impacts of thermal treatments[J/OL]. LWT, 2022, 153: 112545[2025-07-18]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112545>.
- [100] QIN J, ZOU X, LYU S, *et al.* Influence of ionic liquids on lipase activity and stability in alcoholysis reactions[J]. RSC Adv., 2016, 6(90): 87703-87709.
- [101] MARTINOVIĆ T, ANDJELKOVIĆ U, GAJDOŠIK M Š, *et al.* Foodborne pathogens and their toxins[J]. J. Proteomics, 2016, 147: 226-235.
- [102] 白燕. 饲用蛋白酶体外评价及其在肉仔鸡日粮中的应用研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2015.
- [103] LIU H, WANG Y, ZHU D, *et al.* Bioaccessibility and application of soybean isoflavones: a review[J]. Food Rev. Int., 2023, 39(8): 5948-5967.
- [104] HUANG J, HOU Q, YANG Y. Replacing hydrolyzed soybean meal with recombinant  $\beta$ -glucosidase enhances resistance to *Clostridium perfringens* in broilers through immune modulation[J/OL]. Int. J. Mol. Sci., 2024, 25(21): 11700[2025-07-18]. <https://doi.org/10.3390/ijms252111700>.
- [105] NINGRUM A, WARDANI D W, VANIDIA N, *et al.* Evaluation of antioxidant activities from a sustainable source of okara protein hydrolysate using enzymatic reaction[J/OL]. Molecules, 2023, 28(13): 4974[2025-07-18]. <https://doi.org/10.3390/molecules28134974>.
- [106] HENG X, CHEN H, LU C, *et al.* Study on synergistic fermentation of bean dregs and soybean meal by multiple strains and proteases[J/OL]. LWT, 2022, 154: 112626[2025-07-17]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112626>.
- [107] KETAREN P P, BATTERHAM E S, DETTMANN E B, *et al.* Phosphorus studies in pigs[J]. Br. J. Nutr., 1993, 70(1): 289-311.