



餐桌剩余食物酶菌协同固态发酵饲料化利用 工艺研究

张慧新^{1,2}, 郑梦莉², 张铁鹰², 秦玉昌², 马莹^{3*}, 张军民^{2*}

(1. 青岛农业大学食品科学与工程学院, 青岛 266109; 2. 中国农业科学院北京畜牧兽医研究所, 北京 100193;

3. 中国农业科学院饲料研究所 北京 100081)

摘要: 旨在通过对餐桌剩余食物与玉米胚芽粕混合固态发酵技术的研究, 为餐桌剩余食物饲料化利用提供解决方案。以干物质消失率、还原糖含量为检测指标, 采用单因素和响应面等试验方法对餐桌剩余食物-玉米胚芽粕酶、菌协同固态发酵工艺参数进行优化, 基于初始发酵条件, 采用单因素法分别研究纤维素酶添加量、酶制剂 X1 添加量对固态发酵产物干物质消失率还原糖含量的影响。采用响应面法优化获得固态发酵纤维素酶和酶制剂 X1 的最适添加量和发酵时间。选择 24 只体重相近、健康的 22 日龄爱拔益加(AA)肉公鸡随机分为 3 组分别饲喂基础日粮和两种试验日粮, 对代谢能值进行测定。结果表明, 随纤维素酶添加量提高, 还原糖含量和干物质降解率呈上升趋势。当添加量为 $10.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 干物质消失率提升幅度减缓 ($P > 0.05$), 当添加量为 $13.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 还原糖提高幅度减缓。随着酶制剂 X1 添加量的提高, 还原糖含量和干物质消失率总体呈现上升趋势。在 $6.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 还原糖含量与干物质消失率均有下降趋势。以干物质消失率 R1 为响应值, 响应面推荐最佳发酵条件为纤维素酶: $10.154 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 酶制剂 X1: $9.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 乳酸菌固态发酵时间为 96 h。以还原性糖 R2 为响应值, 响应面推荐最佳发酵条件为纤维素酶: $7.842 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 酶制剂 X1: $9.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 发酵时间为 96 h。餐桌剩余食物和玉米胚芽粕混合固态发酵, 在含水率 55%, 37 °C 下发酵 72 h, 与对照组相比, 发酵处理后干物质降解率提高了 19.84%, 还原糖含量提高了 $162.44 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 代谢能值提高 17.8%。结果提示, 利用酶、菌协同固态发酵技术既解决了高水分餐桌剩余食物烘干难的问题, 也大幅提升了其营养价值, 为其饲料化资源利用提供科学依据。

关键词: 餐桌剩余食物; 玉米胚芽粕; 酶菌协同; 固态发酵; 代谢能

中图分类号: S816.35

文献标志码: A

文章编号: 0366-6964(2026)03-1549-10

Study on the Technology of Feed Utilization of Table Leftovers by Enzyme Bacteria Combined with Solid-state Fermentation

ZHANG Huixin^{1,2}, ZHENG Mengli², ZHANG Tieying², QIN Yuchang², MA Ying^{3*}, ZHANG Junmin^{2*}

(1. College of Food Science and Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China;

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

3. Institute of Feed Research of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: The purpose of this study is to provide a solution for the feed utilization of table leftover food by studying the mixed solid-state fermentation technology of table leftover food and corn germ meal. The detection indicators were dry matter disappearance rate and reducing sugar content. The

收稿日期: 2025-03-20

基金项目: “十四五”国家重点研发计划项目(2021YFD1300301)

作者简介: 张慧新, 硕士, 主要从事酶与固态生物发酵研究, E-mail: 18264801220@163.com

* 通信作者: 马莹, 主要从事饲料、畜牧产业经济研究和畜牧业管理工作, E-mail: maying01@caas.cn; 张军民, 主要从事饲料安全风险评估
与新植提产品开发、优质功能畜禽肉蛋生产相关研究, E-mail: zhangjunmin@caas.cn

single factor and response surface and other experimental methods were used to optimize the process parameters of solid-state fermentation of table leftover food-corn germ meal enzyme, and the effects of cellulase addition amount and enzyme preparation X1 addition amount on the dry matter disappearance rate and sugar content of solid-state fermentation products were investigated by single factor method based on the initial fermentation conditions. The optimum addition amount of cellulase and enzyme preparation X1 and fermentation time were obtained by response surface method. Twenty-four 22-day-old Arbor Acres (AA) cockerels of similar body weight and in good health condition were randomly divided into 3 groups, which were fed the basal diet and the two experimental diets, respectively, and the metabolizable energy value was measured. The results showed that as the addition amount of cellulase increased, the content of reducing sugar and the disappearance rate of dry matter increased. When the addition amount was $10.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, the increase of dry disappearance slowed down ($P > 0.05$), and when the addition amount was $13.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, the increase of reducing sugar slowed. As the addition amount of enzyme preparation X1 increased, the content of reducing sugar and the disappearance rate of dry matter tended to increase as a whole. When the addition amount was $6.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, the content of reducing sugar and the disappearance rate of dry matter both showed a downward trend. With dry matter degradation rate R1 as the value, the response surface recommended the best fermentation conditions as cellulase: $10.154 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; Enzyme preparation X1: $90 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, solid fermentation time of lactic acid bacteria was 96 h. With reducing sugar R2 as the response value, the response surface recommended the fermentation conditions as cellulase: $7.842 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; Enzyme preparation X1: $9.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, fermentation was 96 h. The solid-state fermentation of mixing table leftover food and corn germ meal, fermenting for 72 h at 37°C with moisture content of 55%, the dry matter disappearance rate increased by 19.84%, the reducing sugar content increased by $162.44 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$, and the metabolizable energy value increased by 17.8% compared with the control group. The results suggested that the utilization of solid-state fermentation with enzyme and bacteria not only solves the problem of difficult drying of high-moisture table leftover food but also greatly improves its nutritional value, providing a scientific basis for its feed utilization.

Keywords: table leftovers; corn germ meal; enzyme bacteria synergy; solid-state fermentation; metabolic energy

* **Corresponding authors:** MA Ying, E-mail: maying01@caas.cn; ZHANG Junmin, E-mail: zhangjunmin@caas.cn

随着我国饲料工业的发展,蛋白质和能量饲料原料的供需矛盾日益突出。我国作为全球最大的畜牧业生产国和消费国,蛋白质和能量饲料原料的对外依存度一直居高不下,多渠道开发饲料资源是缓解我国饲料资源供需矛盾的有效途径。据统计,我国城市餐饮业每年产生的餐桌剩余食物高达3 300万吨^[1-2],产量集中、营养丰富,饲料化潜力巨大。但是因其含水量高和易腐败的特性严重制约其饲料化应用。因此,开发安全、高效、低能耗的饲料化利用技术是其增值利用的有效途径。其重点在于安全贮存,防止发霉变质,同时选择适宜的辅

料,解决其高黏性,降低烘干成本的协同处理技术成为突破瓶颈的关键。

生物发酵饲料具有营养价值高、安全性好、环境友好^[3]等特点,已得到广泛认可和应用。玉米胚芽粕(corn germ meal, CGM)富含纤维^[4],吸水性较强,是高湿物料适宜的发酵饲料辅料。同时,玉米胚芽粕中的纤维组成以半纤维素为主(约57%),其次是纤维素(约16%)和木质素(约2%)。基于餐桌剩余食物水分高、黏度大和不易储存的特点,以CGM为辅料,采用酶菌协同发酵技术,使之富含寡糖、有机酸和有益菌等功能性物质,并降低烘干成

本,是提高发酵辅料营养价值的关键。

因此,本研究拟通过对单因素和响应面设计方法,对餐桌剩余食物与玉米胚芽粕酶菌协同固态发酵工艺参数进行优化,并测定发酵饲料的肉鸡代谢能值,为餐桌剩余食物饲料化利用技术提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验及仪器

原料:餐桌剩余食物和玉米胚芽粕 35:65 混合(以干物质含量计);试验菌株:本实验室筛选的乳酸菌(HX-31,植物乳杆菌);试验酶:实验室自制纤维素酶(来源毕赤酵母,酶活性:15 000 U·g⁻¹)、固态发酵酶制剂 X1(来源黑曲霉,主要酶活性物质木聚糖酶:5 000 U·g⁻¹)。固态发酵产物:称取餐桌剩余食物、玉米胚芽粕以及上述酶液和菌经混匀后,含水率 55%,置于培养箱中 37℃进行固态发酵。

表 1 试验设计的因素及水平

Table 1 Factors and levels of experimental design

因素 Considerations	A-纤维素酶添加量/(g·kg ⁻¹) A-Cellulase addition	B-X1添加量/(g·kg ⁻¹) B-X1 addition	C-发酵时间/h C-Fermentation time
水平-1 Level-1	7.5	3.0	48
水平 0 Level 0	10.5	6.0	72
水平 1 Level 1	13.5	9.0	96

1.2.3 干物质降解率测定方法 按照国家标准方法 GB/T 6435—2014 测定干物质含量。

干物质降解率(%)=(样品预处理前干物质含量-样品预处理后干物质含量)/样品预处理前干物质含量。

1.2.4 DNS 法测定还原糖含量 DNS 法即二硝基水杨酸法:配置 DNS 试剂,称取 7.5 g 3,5-二硝基水杨酸,14.0 g 氢氧化钠,充分溶解于 1 000 mL 经煮沸冷却后的蒸馏水中。再加入酒石酸钾钠 216.0 g,苯酚(在 50℃水浴中融化)5.5 mL,偏重亚硫酸钠 6.0 g,完全溶解后转入棕色细口瓶中,4℃贮存备用。

分别取 0.2 mL 标准糖液和 0.2 mL 待测样品(使其 pH 为 5~7,含糖量为 0.2~2.0 g·L⁻¹),加入 5 mL 刻度试管中,再加入 0.5 mL DNS 试剂,沸水中显色 5 min 后冷却至室温,加水至 2.5 mL,充分摇匀。以 7230 型分光光度计在 540 nm 处测定上述各溶液的吸光度 A 值。以木糖或葡萄糖浓度为纵坐

1.2 餐桌剩余食物-玉米胚芽粕固态发酵条件优化

1.2.1 单因素试验 初始发酵工艺:称取 140 g 餐桌剩余食物和 72 g 玉米胚芽粕,添加纤维素酶和固态发酵酶制剂 X1 后混合均匀,置于 3 个 50 mL 塑料离心管中,乳酸菌(>10⁸ CFU·mL⁻¹)接种量 5%,含水率 55%,密封,37℃培养 24 h。发酵后检测发酵产物干物质降解率和还原糖产量。基于初始发酵条件,采用单因素法分别研究纤维素酶添加量(0、1.5、4.5、7.5、10.5、13.5、16.5 g·kg⁻¹)、酶制剂 X1 添加量(1.5、3.0、4.5、6.0、7.5、9.0 g·kg⁻¹)对固态发酵产物干物质降解率和还原糖含量的影响。

1.2.2 响应面分析设计优化最佳固态发酵条件

根据单因素试验结果,以干物质降解率 R1 和还原糖含量 R2 为响应值,通过 Box-Behnken 法进行响应面试验设计(表 1),以进一步得到酶菌协同餐桌剩余食物玉米胚芽粕混合固态发酵的最优条件。

标,以 A 值为横坐标,作出标准曲线并回归出标准方程。利用标准方程由被测样品的 A 值即可求得其还原糖浓度。

1.3 动物试验设计

1.3.1 试验动物及饲料 按照农业农村部《白羽肉鸡饲料原料代谢能和净能测定技术规程》,选择 24 只体重相近、健康的 22 日龄爱拔益加(AA)肉公鸡随机分为 3 组,每组 8 个重复,每个重复 1 只鸡。处理分别为:基础饲料组;未发酵餐桌剩余食物-玉米胚芽粕组;发酵餐桌剩余食物-玉米胚芽粕组。在 25~28 日龄,按照 AA 肉鸡营养标准(Aviagen 公司《AA 肉鸡营养手册-2019》)推荐的营养需要量配制基础饲料(表 2)和试验饲料。其中,试验饲料为 2 种待测原料分别替代 30% 的基础饲料。用于测定肉鸡的基础饲料及 2 个试验组的 AME。预饲期 3 d,肉鸡 22 日龄起,停料 17 h 后,继续按要求饲喂上述饲料,同时开始收集全部粪便;饲喂 55 h 后停料,计算耗料量;继续收集粪便 17 h(总共 72 h)。肉鸡

表2 基础饲粮成分组成与营养水平

Table 2 Composition and nutritional level of basic diet

%

项目 Item	1-21 d	22-42 d
玉米 Corn	51.83	53.09
豆粕 Soybean meal	36.50	33.00
面粉 Flours	3.00	5.00
大豆油 Soybean oil	4.00	5.50
磷酸氢钙 CaHPO_4	1.90	1.65
石粉 Limestone	1.20	0.90
氯化钠 NaCl	0.30	0.30
赖氨酸 Lys	0.57	0.15
蛋氨酸 Met	0.18	0.10
缬氨酸 Val	0.11	0.00
复合矿物预混料 Mineral premix ^a	0.20	0.10
抗氧化剂 Antioxidant	0.03	0.03
氯化胆碱 Choline chloride	0.15	0.15
维生素预混料 Vitamin premix ^b	0.035	0.035
合计 Total	100.00	100.00
营养水平 Nutrient level ^c		
代谢能/(MJ·kg ⁻¹) ME	12.665	13.193
粗蛋白质 CP	21.42	19.86
钙 Ca	0.99	0.81
有效磷 P	0.45	0.40
赖氨酸 Lys	1.42	1.11
蛋氨酸 Met	0.51	0.41
苏氨酸 Thr	0.93	0.78
精氨酸 Arg	1.46	1.36
缬氨酸 Val	0.95	0.90
蛋氨酸+胱氨酸 Met+Cys	0.68	0.65

^a. 复合矿物预混料为每千克饲料提供:Fe, 40 mg; Cu, 16 mg; Zn, 100 mg; Mn, 120 mg; I, 1.25 mg; Se, 0.30 mg. ^b. 维生素预混料为每千克饲料提供:VA, 12 000 IU; VD₃, 4 500 IU; VE, 24 IU; VK₃, 3 mg; VB₁, 3 mg; VB₂, 9.6 mg; VB₆, 3 mg; VB₁₂, 0.018 mg; 泛酸, 15 mg; 烟酸, 39 mg; 叶酸, 1.5 mg; 生物素, 0.15 mg. ^c. 代谢能为计算值, 其他营养水平为实测值

^a. The mineral premix provides following per kg of diet: Fe, 40 mg; Cu, 16 mg; Zn, 100 mg; Mn, 120 mg; I, 1.25 mg; Se, 0.30 mg. ^b. The vitamin premix provides following per kg of diet: VA, 12 000 IU; VD₃, 4 500 IU; VE, 24 IU; VK₃, 3 mg; VB₁, 3 mg; VB₂, 9.6 mg; VB₆, 3 mg; VB₁₂, 0.018 mg; pantothenic acid, 15 mg; nicotinic acid, 39 mg; folic acid, 1.5 mg; biotin, 0.15 mg. ^c. Metabolizable energy is calculated and other nutrient levels are measured

3层笼养,舍内通风、免疫程序等按照《AA肉鸡管理手册》进行,试验期间自由采食和饮水。

1.3.2 样品处理及化学成分分析 饲粮及排泄物于65℃鼓风干燥箱中烘干,冷却后放置24 h称重,粉碎过0.42 mm筛,同步测定干物质(DM)含量。饲粮及饲料原料采样后,用于测定纤维含量的样品粉碎过0.84 mm筛粉,测定其他化学成分的样品粉碎过0.42 mm筛。

指标测定方法:饲粮及排泄物水分(GB/T 6435—

2014)、粗蛋白质(CP,GB/T 6432—2018)含量及总能(GE,ISO 9831:1998)、饲料原料水分(GB/T 6435—2014)、CP(GB/T 6432—2018)、EE(GB/T 6433—2006)、粗灰分(Ash,GB/T 6438—2007)、粗纤维(CF,GB/T 6434—2022)、酸性洗涤纤维(ADF,NY/T 1459—2022)含量及GE(ISO 9831:1998)。

1.4 数据统计与分析

试验数据经Excel 2021(Microsoft Co.,Redmond,

USA)初步处理后,采用SPSS 20.0(International Business Machines Co., Armonk, USA)统计软件进行单因素方差分析(ANOVA)和Duncan's多重比较。结果以Mean和SEM表示, $P<0.05$ 代表各组之间具有显著性差异, $P>0.05$ 代表各组差异不显著。

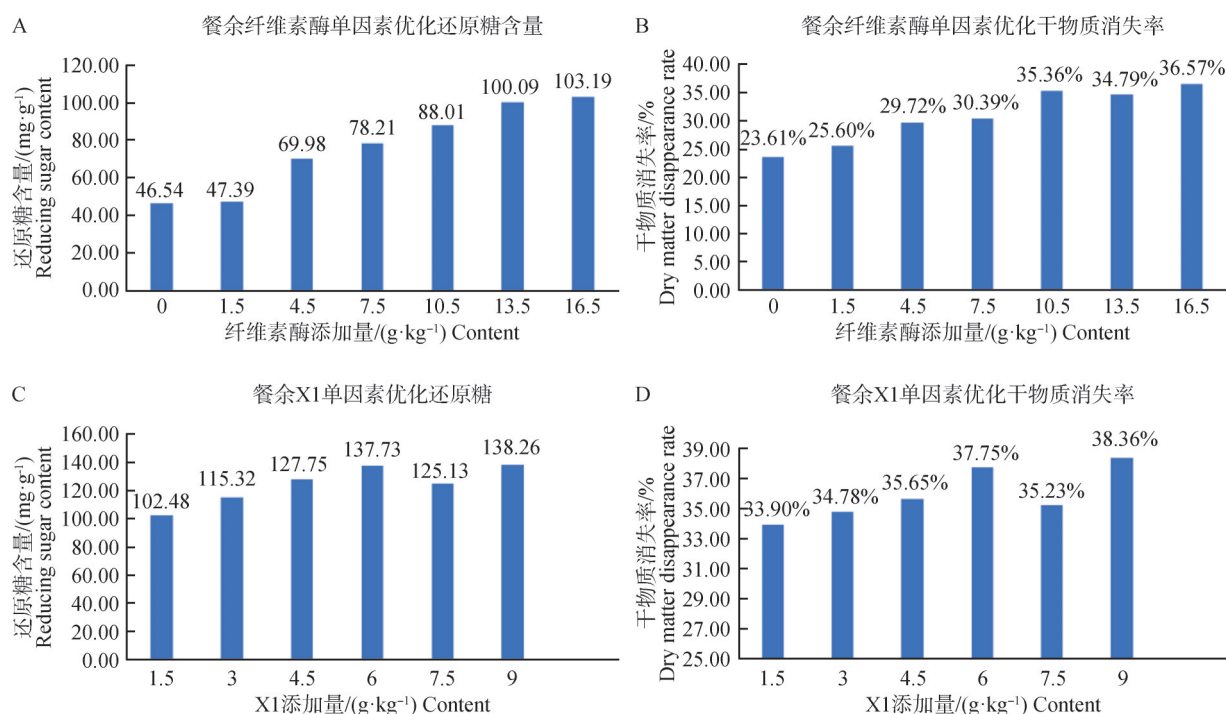
2 结果

2.1 单因素试验

由图1A、图1B可知,随纤维素酶添加量提高,还原糖含量和干物质降解率呈上升趋势。当添加量为 $10.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,干物质降解率提升幅度减缓

($P>0.05$),当添加量为 $13.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,还原糖含量提高幅度减缓。基于纤维素酶单因素优化结果与成本综合考虑,以 7.5 、 10.5 、 $13.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 三个添加量作为响应面试验优化纤维素酶适宜添加量的3个水平。

由图1C、图1D可知随酶制剂X1添加量的提高,还原糖含量和干物质降解率总体呈现上升趋势。在 $6.0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,还原糖含量与干物质降解率均有下降趋势。根据X1单因素优化结果与成本的考虑,选取 3.0 、 6.0 、 $9.0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,作为响应面试验优化X1适宜添加量的3个水平。



A. 纤维素酶单因素优化还原糖含量; B. 纤维素酶单因素优化干物质降解率; C. X1单因素优化还原糖影响; D. X1单因素优化干物质降解率

A. Vitamin enzyme single factor optimization of reducing sugar content; B. Cellulase single factor optimization of dry matter disappearance rate; C. X1 single factor optimization of reducing sugar effect; D. X1 single factor optimization of dry matter disappearance rate

图1 不同纤维素酶和X1添加量对餐桌剩余食物-玉米胚芽粕中纤维降解的影响

Fig. 1 Effect of different cellulase and enzyme preparation X1 additions on fiber degradation in table leftovers-corn germ meal

2.2 响应面试验

2.2.1 响应面模型的构建与检验 由表3、表4可知,对R1干物质降解率模型 P 值($\text{prob}>F$) <0.0025 、R2还原糖含量模型 P 值($\text{prob}>F$) <0.0088 ,说明该模型的显著性较好。由表5、表6可

知,R1干物质降解率模型的确定系数 $R^2>0.9323$ 、R2还原糖含量模型的确定系数 $R^2>0.9002$,失拟项不显著,这表明方程的拟合性较好,可用于分析和预测干物质降解率和还原糖含量。

根据试验结果,以干物质降解率R1、还原糖R2

表 3 回归方程方差分析(R1)

Table 3 Regression equation analysis of variance (R1)

变异来源 Source of variation	平方和 Sum of Squares	自由度 <i>Df</i>	均方 Mean Square	F 值 F-value	P 值 <i>P</i> -value	显著性 Significance
模型 Model	0.013 4	9	0.001 5	10.71	0.002 5	Significant
A-纤维素酶添加量 A-Cellulase addition	0.000 1	1	0.000 1	0.085 9	0.778 0	
B-X1 添加量 B-X1 addition	0.002 8	1	0.002 8	20.48	0.002 7	
C-发酵时间 C-Fermentation time	0.000 8	1	0.000 8	6.03	0.043 8	
AB	0.000 6	1	0.000 6	4.05	0.084 2	
AC	0.000 8	1	0.000 8	6.07	0.043 3	
BC	0.000 2	1	0.000 2	1.33	0.286 5	
A ²	0.001 2	1	0.001 2	8.60	0.022 0	
B ²	0.001 1	1	0.001 1	7.71	0.027 4	
C ²	0.005 9	1	0.005 9	42.69	0.000 3	
残差 Residual	0.001 0	7	0.000 1			
失拟项 Lack of Fit	0.000 7	3	0.000 2	2.71	0.179 6	
误差 Pure Error	0.000 3	4	0.000 1			
总和 Cor Total	0.014 4	16				

表 4 回归方程方差分析(R2)

Table 4 Regression equation analysis of variance (R2)

变异来源 Source of variation	平方和 Sum of Squares	自由度 <i>Df</i>	均方 Mean Square	F 值 F-value	P 值 <i>P</i> -value	显著性 Significance
模型 Model	7 654.13	9	850.46	7.01	0.008 8	Significant
A-纤维素酶添加量 A-Cellulase addition	75.10	1	75.10	0.619 3	0.457 1	
B-X1 添加量 B-X1 addition	1 315.02	1	1 315.02	10.85	0.013 2	
C-发酵时间 C-Fermentation time	4 385.13	1	4 385.13	36.16	0.000 5	
AB	125.55	1	125.55	1.04	0.342 8	
AC	496.99	1	496.99	4.10	0.082 6	
BC	67.53	1	67.53	0.556 9	0.479 8	
A ²	258.37	1	258.37	2.13	0.187 7	
B ²	195.89	1	195.89	1.62	0.244 3	
C ²	619.45	1	619.45	5.11	0.058 3	
残差 Residual	848.79	7	121.26			
失拟项 Lack of Fit	601.96	3	200.65	3.25	0.1422	
误差 Pure Error	246.83	4	61.71			
总和 Cor Total	8 502.92	16				

表 5 模型可信度分析(R1)

Table 5 Model reliability analysis (R1)

标准差 Std. Dev.	0.011 8	决定系数 R ²	0.932 3
平均值 Mean	0.443 0	调整决定系数 Adjusted R ²	0.845 2
变异系数/% CV	2.66	预测决定系数 Predicted R ²	0.238 6
		精密度 Adeq Precision	12.013 2

表 6 模型可信度分析(R2)

Table 6 Model reliability analysis (R2)

标准差 Std. Dev.	11.01	决定系数 R ²	0.900 2
平均值 Mean	196.98	调整决定系数 Adjusted R ²	0.771 8
变异系数/% CV	5.59	预测决定系数 Predicted R ²	-0.178 1
		精密度 Adeq Precision	9.351 4

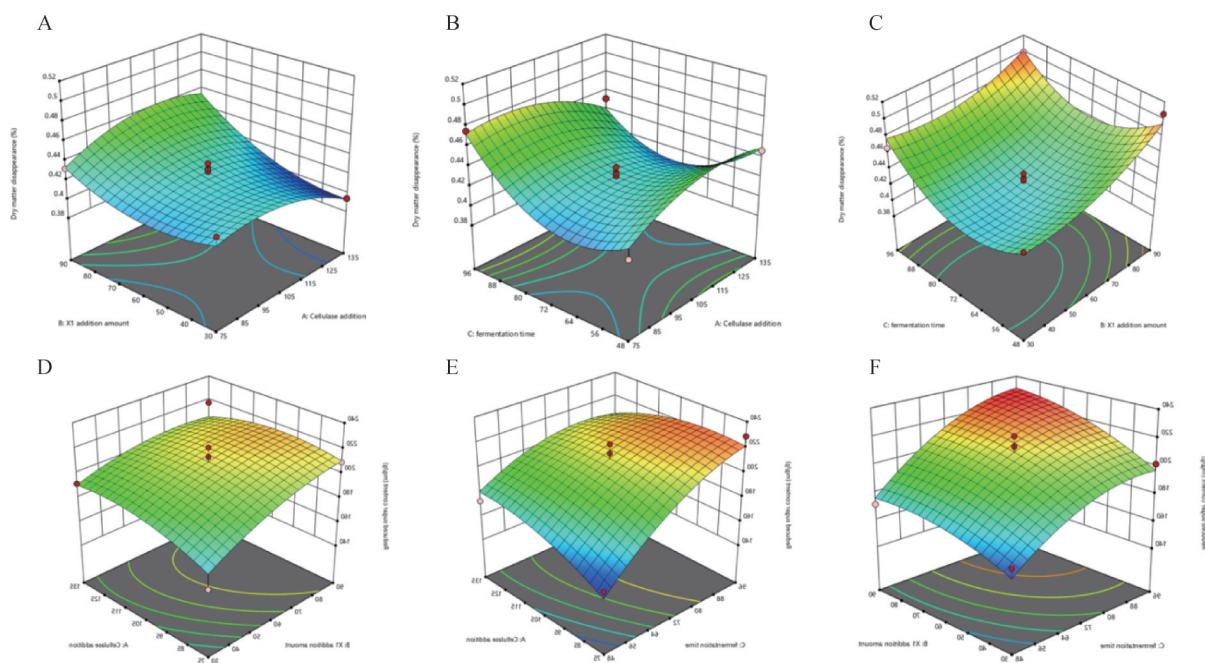
含量为响应值,进行二次回归方程拟合,得到干物质降解率R1对各影响因素A(纤维素酶添加量)、B(酶制剂X1添加量)、C(发酵时间)的三元二次回归方程:

$$R1=0.4258-0.0012A+0.0189B+0.0102C+0.0119AB-0.0145AC-0.0068BC-0.0168A^2+0.0160B^2+0.0375C^2;$$

$$R2=209.586+3.0639A+12.8210B+23.4124C-5.6025AB-11.1466AC+4.1088BC-7.8335A^2-6.82087B^2-12.1293C^2.$$

2.2.2 响应面模型的交互作用与最佳发酵条件

根据回归方程做响应面图,图2所示为分别以响应值R1、R2的响应面两两因素交互作用。



A. 以R1为响应值纤维素酶添加量与X1添加量交互作用;B. 以R1为响应值纤维素酶添加量与时间交互作用;C. 以R1为响应值X1添加量与时间交互作用;D. 以R2为响应值纤维素酶添加量与X1添加量交互作用;E. 以R2为响应值纤维素酶添加量与时间交互作用;F. 以R2为响应值X1添加量与时间交互作用

A. The interaction between cellulase addition and X1 addition with R1 as the response value; B. The interaction between cellulase addition and time with R1 as the response value ; C. With R1 as the response value, X1 addition amount and time interaction; D. The interaction between cellulase addition and X1 addition with R2 as the response value; E. The interaction between cellulase addition and time with R2 as the response value; F. Interaction between X1 addition and time with R2 as the response value

图2 响应面两两因素交互作用

Fig. 2 Response surface interaction of two factors

以干物质降解率 R1 为响应值时最佳发酵条件:纤维素酶添加量 $10.154 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、X1 添加量 $9.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、发酵时间 96 h。以还原性糖 R2 为响应值时最佳发酵条件:纤维素酶添加量 $7.842 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、X1 添加量 $9.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、发酵时间 96 h。

餐桌剩余食物和玉米胚芽粕混合固态发酵,在含水率 55%、温度 37℃、发酵 72 h 条件下。对照组干物质降解率为 23.61%,试验组干物质降解率为 43.45%,较对照组提高了 19.84%;对照组还原糖含量为 $45.65 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,试验组还原糖含量为 $208.09 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,较对照组提高了 $162.44 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

表 7 肉鸡饲喂固态发酵餐桌剩余食物-玉米胚芽粕饲料的表现代谢能

Table 7 Metabolizable energy of white feather broilers fed solid-state fermented table leftovers-germ meal diet

项目 Item	表观代谢能/(MJ·kg ⁻¹) AME	SEM	P 值 P-value
基础饲料 Basic feeding grain	13.51 ^a	0.198	<0.001
餐桌剩余食物-玉米胚芽粕 Table leftovers-germ meal diet	12.14 ^b	0.174	<0.001
发酵餐桌剩余食物-玉米胚芽粕 Fermented table leftovers-germ meal diet	12.62 ^b	0.121	<0.001

表 8 待测饲料的表现代谢能值

Table 8 AME of diets to be tested

待测饲料 Item	表观代谢能/(MJ·kg ⁻¹) AME	SEM	P 值 P-value
餐桌剩余食物-玉米胚芽粕 Table leftovers-germ meal diet	8.94	0.050	0.059
发酵餐桌剩余食物-玉米胚芽粕 Fermented table leftovers-germ meal diet	10.53	0.341	

3 讨论

3.1 餐桌剩余食物与玉米胚芽粕固态发酵工艺参数优化

国内外研究表明,餐桌剩余食物作为动物饲料潜力巨大。但因其高含水量(70%~90%)和易腐败等特性,严重制约了其饲料化利用。采用酶菌协同发酵处理物料,需要一定的水来满足酶的底物水解和微生物生长的需要^[5]。本试验以餐桌剩余食物为基础,将其与干基玉米胚芽粕混合进行酶菌协同固态发酵,充分利用餐桌剩余食物高水分特性,满足酶菌协同发酵处理对水分的需要。餐桌剩余食物自身富含高蛋白、高能量等营养物质,且消化利用率高。因此,酶菌协同发酵工艺的重点在于提高发

2.3 餐桌剩余食物固态发酵物表现代谢能值测定

由表 7 可知,基础饲料肉鸡 AME 为 $13.51 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$,未发酵餐桌剩余食物-玉米胚芽粕组 AME 为 $12.14 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$,发酵餐桌剩余食物-玉米胚芽粕组 AME 为 $12.62 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。从表 8 得出未发酵餐桌剩余食物-玉米胚芽粕组待测饲料 AME 为 $8.94 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$,发酵餐桌剩余食物-玉米胚芽粕组待测饲料 AME 为 $10.53 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。与未发酵组相比,餐桌剩余食物-玉米胚芽粕经固态发酵后的发酵饲料比未发酵的饲料 AME 提高 17.8%。

酵辅料的营养价值,增加餐桌剩余食物饲料化产品的附加值。

通过酶菌协同发酵将植物纤维转变为还原糖或有机酸,是挖掘高纤维物料潜在能值的重要手段。邓生青^[6]研究发现,在混菌固态发酵体系中加入纤维素酶、果胶酶和 α -半乳糖苷酶等酶菌协同发酵菜籽饼,显著降低了菜籽饼中 NDF、ADF 含量,使菜籽饼表面结构发生改变,蛋白质分子质量变小。王卫卫^[7]研究发现,利用植物乳杆菌、酿酒酵母协同甘露聚糖酶、纤维素酶和 α -半乳糖苷酶混合固态发酵棕榈粕,显著降低了粗纤维和 NDF 的含量。朱龙博^[8]研究发现,采用菌酶协同固态发酵芦苇秸秆与混菌固态发酵芦苇秸秆相比,纤维素含量显著降低,蛋白含量明显提升。由此可见,纤维素酶在

发酵处理高纤维物料时,对降解纤维发挥着关键作用。同时纤维素酶水解纤维素产生的葡萄糖可直接被动物利用,而木聚糖酶水解产物木寡糖动物利用率较低。因而,纤维素酶是生物发酵处理高纤维物料的首选酶制剂。

玉米胚芽粕的纤维组成以半纤维素为主(约57%),其次是纤维素(约16%)和木质素(约2%),其中的半纤维素和纤维素可以通过酶解或发酵转化为可发酵糖,用于生产高附加值产品。Chen等^[9]研究表明,与对照组、纤维素酶组相比,菌酶组合发酵显著改善了玉米胚芽粕的营养特性。经过固态发酵48 h后,发酵产物中粗蛋白和酸溶性蛋白的含量均增加,纤维素降解率从5.02%增加至50.74%。

本研究中,随着纤维素酶剂量增加,干物质降解率和还原糖含量提高,证明纤维素酶在水解玉米胚芽粕纤维中发挥着重要作用。本研究中纤维素酶与酶制剂X1协同乳酸菌固态发酵餐桌剩余食物与玉米胚芽粕,干物质降解率提高了15.62%,还原糖含量提高了114.85 mg·g⁻¹。植物纤维会通过阿魏酸酯键相互交联,形成稳定的空间结构,且纤维素通常被半纤维素和木质素包裹,影响其降解效率。因此,要实现大幅度降解纤维,深度挖掘其潜在能值,需多酶组合。固态发酵环境中,微生物通常会分泌多种酶类以降解复杂的固态基质,而固态发酵酶制剂具有酶谱广^[10]、成分稳定的特点。通过添加固态发酵酶制剂X1,解构纤维的空间结构,可提高降解效率。本研究发现,在纤维素酶的基础上添加固态发酵酶制剂X1可进一步提高干物质降解率和还原糖产量。

可见,餐桌剩余食物玉米胚芽粕经酶菌协同固态发酵后干物质降解率和还原糖含量显著提高,酶菌协同固态发酵处理是提高高纤维饲料原料营养价值的有效方法。

3.2 餐桌剩余食物固态发酵物代谢测定

采用酶菌协同发酵处理饲料原料可大幅提高代谢能值。邓生青^[6]研究发现,采用酶菌协同发酵菜籽饼粕的肉鸡AME较未发酵显著提高。吴正可^[11]研究发现,菜籽粕经发酵处理后,肉鸡AME由7.41 MJ·kg⁻¹增至8.51 MJ·g⁻¹。邱良伟等^[12]研究发现,一些营养价值较差的饲料原料,如菜籽粕和棉籽粕,其抗营养因子种类多,蛋白质分子较大,生物学利用率低,营养价值改善空间大。不同饲料原料经发酵处理后,其代谢能提升幅度存在较大差

异,这可能与饲料原料的种类,发酵菌种以及发酵工艺有关。本研究利用纤维素酶、固态发酵酶X1及乳酸菌协同兼性厌氧发酵处理餐桌剩余食物与玉米胚芽粕混合物,大幅度提高了发酵产物的干物质降解率和还原糖含量,改善了其纤维的可利用性。同时与兼性厌氧发酵工艺相结合,减少发酵过程能量损失,最终使其代谢能值提升17.8%。这说明通过多种纤维水解酶组合及结合乳酸菌兼性厌氧发酵工艺,是挖掘高纤维素饲料能值潜力的有效技术途径。

4 结 论

综上,餐桌剩余食物开发利用价值高,营养价值提升空间大,玉米胚芽粕作为辅料与餐桌剩余食物协同发酵能够显著提高肉鸡代谢能,为餐桌剩余食物饲料化利用提供科学依据。

参考文献(References):

- [1] 李世强,马莹,李军国,等.餐桌剩余食物饲料原料对肉鸡颗粒饲料质量,生长性能,血清生化指标及肉品质的影响[J].饲料工业,2024,45(18):55-63.
LI S Q, MA Y, LI J G, et al. Effects of table leftover food feed raw materials on broiler feed pellet feed quality, growth performance, serum biochemical indexes and meat quality [J]. *Feed Industry*, 2024, 45 (18):55-63. (in Chinese)
- [2] 南楠.餐桌剩余食物饲料化利用现状及对策研究[D].北京:中国农业科学院,2014.
NAN N Research on the current situation and countermeasures of feed utilization of table surplus food [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014. (in Chinese)
- [3] LUO C H, DAN Z, ZHAO K et al. Optimization of South China 5 Cassava-Leucaena protein feed production by Kombucha in solid-state fermentation [J]. *AHFS*, 2010, 2(3):8-11.
- [4] ZHANG Z, LIU Z, ZHANG S, et al. Effect of inclusion level of corn germ meal on the digestible and metabolizable energy and evaluation of ileal AA digestibility of corn germ meal fed to growing pigs [J]. *J Anim Sci*, 2019, 97(2):768-778.
- [5] CHEN J, CAI Y, WANG Z, et al. Solid-state fermentation of corn straw using synthetic microbiome to produce fermented feed: The feed quality and conversion mechanism [J]. *Sci Total Environ*, 2024,

- 920;171034.
- [6] 邓生青. 酶菌协同发酵菜籽饼粕工艺优化及肉鸡的饲用价值评价[D]. 北京:中国农业科学院,2023.
- DENG S Q. Optimization of enzyme and bacteria collaborative fermentation of rapeseed cake meal process and evaluation of feed value of broilers [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2023. (in Chinese)
- [7] 王卫卫. 菌酶协同处理棕榈仁粕及其对肉鸡生长影响机理研究[D]. 北京:中国农业科学院,2021.
- WANG W W. Research on the synergistic treatment of palm kernel meal by bacterial enzymes and its effect mechanism on the growth of broilers [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021. (in Chinese)
- [8] 朱龙博. 芦苇秸秆纤维素高效降解的菌酶协同发酵工艺研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2024.
- ZHU L B. Research on bacterial enzyme co-fermentation process for efficient degradation of cellulose in reed straw [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2024. (in Chinese)
- [9] CHEN L, CHEN W, ZHENG B, et al. Fermentation of NaHCO_3 -treated corn germ meal by *Bacillus velezensis* CL-4 promotes lignocellulose degradation and nutrient utilization[J]. *Appl Microbiol Biot*, 2022, 106(18):6077-6094.
- [10] RADHAKUMARI M, TAHA M, SHAHSAVARI E, et al. Pongamia pinnata seed residue - A low cost inedible resource for on-site/in-house lignocellulases and sustainable ethanol Production [J]. *Renew Energ*, 2017, 103:682-687.
- [11] 吴正可. 多菌种固态发酵菜籽粕的工艺优化及其对肉鸡的饲用价值评定[D]. 北京:中国农业科学院, 2018.
- WU Z K. Process optimization of multi-strain solid-state fermentation rapeseed meal and its feed value evaluation for broilers [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018. (in Chinese)
- [12] 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.
- QIU L W, GU Y J, SHA W F, et al. Study of solid substrate fermentation with complex microbial on rapeseed meal [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2015, 43(3):209-211. (in Chinese)
- (编辑 范子娟)