

不同益生菌固态发酵豆粕的工艺研究

张佳斌¹, 张雪芳¹, 李利君^{1,2}, 肖琼^{1,3,4}, 翁惠芬^{1,3,4}, 倪辉^{1,2,3}, 肖安风^{1,2,3,4}

(1. 集美大学食品与生物工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 福建省食品微生物与酶工程重点实验室, 福建 厦门 361021; 3. 福建省海洋功能食品工程技术研究中心, 福建 厦门 361021; 4. 厦门市海洋功能食品重点实验室, 福建 厦门 361021)

[摘要] 针对传统发酵豆粕的品质与豆粕的利用率低等缺陷, 用枯草芽孢杆菌、酿酒酵母菌、乳酸菌(保加利亚乳杆菌与嗜热链球菌以1:1比例混合)为发酵菌株, 进行单因素发酵豆粕的试验。以发酵温度、料水比、接种量及发酵时间为单因素, 经优化试验得到, 枯草芽孢杆菌发酵豆粕的最佳条件: 发酵温度为37℃, 料水比(m/V)为1:1, 接种量为5%, 发酵时间为48h, 此时发酵豆粕粗蛋白质量分数增幅最大为62.3%, 呈偏碱性的酱香味; 酿酒酵母菌优化后的发酵工艺条件: 发酵温度为31℃, 料水比(m/V)为1:1, 接种量为5%, 发酵时间为60h, 此时发酵豆粕粗蛋白质量分数为53.8%, 具有浓郁的酵母香; 乳酸菌发酵豆粕的最佳条件: 发酵温度为37℃, 料水比(m/V)为1:1.2, 接种量为7%, 发酵时间为72h, 此时发酵豆粕粗蛋白质量分数为48.6%, 有酸香味。

[关键词] 枯草芽孢杆菌; 益生菌; 豆粕; 固态发酵; 工艺优化

[中图分类号] TS 201.1

Solid-fermentation Process of Soybean Meal with Different Probiotics

ZHANG Jiabin¹, ZHANG Xuefang¹, LI Lijun^{1,2}, XIAO Qiong^{1,3,4}, WENG Huifen^{1,3,4},
NI Hui^{1,2,3}, XIAO Anfeng^{1,2,3,4}

(1. College of Food and Biological Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. Key Laboratory of Food Microbiology and Enzyme Engineering of Fujian Province, Xiamen 361021, China;

3. Fujian Provincial Engineering Technology Research Center of Marine Functional Food, Xiamen 361021, China;

4. Xiamen Key Laboratory of Marine Functional Food, Xiamen 361021, China)

Abstract: In this study, *Bacillus subtilis*, *Saccharomyces cerevisiae*, *Lactobacillus* (*Lactobacillus bulgaricus* and *Streptococcus thermophilus* were mixed in a ratio of 1:1) were used as producing strains to improve the quality and utilization of soybean meal. The optimal fermentation conditions for maximizing the protein production by *Bacillus subtilis* from soybean meal were determined and revealed that the use of 5% inoculum water ratio 1:1, and temperature of 37℃ were the best conditions. Under these conditions, crude protein content reached 62.3% after 48 h of fermentation creating an alkaline sauce flavor. In the same way, the optimal conditions for fermented soybean meal by *Saccharomyces cerevisiae* were 5% inoculums, water ratio 1:1, temperature of 31℃ and fermentation time of 60 h. Under these optimal conditions, crude protein content reached

[收稿日期] 2017-12-18

[修回日期] 2018-01-21

[基金项目] 福建省高校产学研合作项目(2016N5008); 福建省科技重大专项项目(2015NZ0001-1); 国家海洋公益行业科研专项(201505033-2); 福建省海洋高新产业发展专项项目(闽海洋高新[2016]08号)

[作者简介] 张佳斌(1996—), 男, 硕士生, 从事食品生物技术方向研究。通信作者: 肖安风(1973—), 男, 教授, 博士, 从事食品生物技术方向研究, E-mail: xxaaffeng@jmu.edu.cn。

53.8% creating a rich yeast flavor. Similarly, the optimal conditions for fermented soybean meal by *Lactobacillus* were 5% inoculum, water ratio 1:1.2, temperature of 37 °C, and fermentation time of 72 h. Under these conditions, crude protein content reached 48.6% creating a acid flavor.

Keywords: *Bacillus subtilis*; probiotics; soybean meal; solid state fermentation; process optimization

0 引言

豆粕是大豆提取豆油后的残渣经加工得到的副产品^[1]。豆粕与花生、菜粕等植物源性的蛋白源相比,具有营养成分均匀、消化利用率高、适口性好等优点;与骨肉粉动物源性蛋白源相比,具有抗氧化强、安全系数高和货源充足等优势^[2-4]。因此,豆粕作为一种优质的植物性蛋白饲料源,在畜禽饲料业中具有广泛的使用价值^[5]。

豆粕中含有多种抗营养因子包括大豆抗原蛋白、大豆寡糖、植酸和胰蛋白酶抑制因子等,这些抗营养因子限制了豆粕中有效成分在动物体内的消化与利用^[6-7]。研究表明^[8-14],豆粕在可控制条件下经过微生物发酵处理,不仅对抗营养因子有降解作用,还可以把大分子蛋白质和碳水化合物降解成利于动物消化吸收的多肽类和糖类,并且富含活性益生菌、有机酸、消化酶以及生物活性因子等多种有益代谢产物,更有利于动物的消化吸收。

微生物发酵豆粕,降解豆粕中抗营养因子是发酵的目的之一,关键是通过微生物发酵提高豆粕的营养价值和扩大豆粕的使用范围。现在国内已有企业在生产发酵豆粕,但由于生产工艺不同,生产的发酵豆粕的品质差异较大^[15]。目前,微生物发酵豆粕的研究往往着重于单纯的抗营养因子的去除,而关于如何在有效去除抗营养因子的基础上,改善豆粕的饲用品质,提高豆粕的利用率的研究较少。针对目前存在的这些问题,本试验分别利用枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)、乳酸菌(*Lactobacillus*)、酿酒酵母菌(*Saccharomyces cerevisiae*)3种益生菌,对豆粕进行微生物固态发酵条件进行优化,研究不同菌种和发酵条件对豆粕营养成分的影响,为更好地开发和利用豆粕这种优质植物蛋白源提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料

豆粕,厦门夏商淘化大同食品有限公司。

1.2 菌种

枯草芽孢杆菌(*B. subtilis*)、酿酒酵母(*S. cerevisiae*)均为本实验室保藏菌种;德式乳杆菌保加利亚亚种(*Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus*)20243、嗜热链球菌(*Streptococcus thermophilus*)21718由菌种保藏中心提供,在本文中将二者合称为乳酸菌(*Lactobacillus*)。

1.3 发酵菌液的制备

将枯草芽孢杆菌接种于MNB液体培养基中,置于180 r/min摇床,37 °C培养12 h;酿酒酵母菌接种于YPD液体培养基中,置于180 r/min摇床,25 °C培养24 h;乳酸菌接种于MRS液体培养基中,控温42 °C,静置厌氧培养48 h。

1.4 豆粕固态发酵

将豆粕分装于250 mL三角瓶中灭菌(121 °C、高压灭菌20 min),冷却备用。按一定接种量将种子液接入灭菌后的三角瓶中,加无菌水并搅拌均匀后静置培养,自然pH值。发酵结束后收集样品,60 °C烘干、粉碎后密封保藏于-20 °C冰柜中用于检测指标的测定。

1.5 豆粕单菌株发酵单因素试验设计

将豆粕、无菌水、菌液(其中乳酸菌菌液中保加利亚乳杆菌与嗜热链球菌各占50%)配制后置于恒温培养箱中发酵48 h,以发酵温度、料水比、接种量为变量设计单因素实验,筛选得到最优条件后,将发酵时间设为变量,在动态发酵过程中研究其发酵效果。

1.6 感官评价

参照国标 GB 21172—2007^[16]和农业行业标准 NYT 2218—2012^[17]的规定以及陈莹等^[18]使用的感官分析方法并有所改进：设定在光线正常及无异味的条件下，将适量样品倒入干净的玻璃容器中，通过目测、鼻嗅、手感分别评定样品的颜色、气味和质地，具体标准见表 1。

表 1 发酵豆粕感官评价标准表
Tab. 1 Sensory evaluation of fermented soybean meal

评价项目 Items	分值(10 分制) Score/分		
	0 ~ 3	4 ~ 6	7 ~ 10
颜色 Color	浅黄色,接近原料色	深黄色	褐色至深褐色
	Light yellow, close to raw material	Dark yellow	Brown ~ dark brown
气味 Odor	烤大豆香味兼轻微发酵味	无豆香味,偏重于发酵味	发酵味浓郁
	Roasted soy aroma and slight fermented taste	No bean odor, heavy fermented taste	Rich yeast flavor
质地 Texture	干燥粗糙且颗粒明显	柔软粘手	水润粘稠、非常粘手
	Dry rough and particles significantly	Soft and sticky	Watery and sticky

1.7 粗蛋白含量测定

按照徐佳璐等^[19]和国标 GB/T 6432—1994^[20]饲料中粗蛋白测定方法进行测定。

1.8 发酵豆粕 pH 值

取各个发酵点的发酵豆粕样品 1.0 g，加蒸馏水 50 mL，于摇床上（180 r/min）振荡 20 min，过滤，测上清液 pH 值。

1.9 物料回收率

参考文献 [21]，准确称量发酵前后物料质量，发酵豆粕的物料质量与原料的物质质量的比值，即为物料回收率，公式为： $F = m_{\text{FSBM}}/m_{\text{SBM}} \times 100$ ，其中， F 为物料回收率（%）； m_{FSBM} 为发酵豆粕的质量（g）； m_{SBM} 为豆粕原料质量（g）。

2 结果与分析

2.1 枯草芽孢杆菌发酵豆粕条件的优化

2.1.1 温度对枯草芽孢杆菌发酵豆粕的影响

温度的高低影响着微生物菌株对营养物质的吸收能力和代谢产物的分泌和运输速率，直接关系到发酵豆粕品质的优劣^[22]。由图 1 可见，以发酵后豆粕的感官评价为主，豆粕在 37 ℃ 发酵时，发酵豆粕呈褐色，醇香气味浓郁，质地偏柔软黏稠，综合感官评价效果最佳。以发酵后豆粕粗蛋白质量分数为辅，在所控条件下，发酵豆粕的粗蛋白质量分数先增加后降低，在发酵温度为 37 ℃ 时达到最高，达到 59.60%，且鉴于芽孢杆菌抗逆性强和稳定的性能，低温状态 31 ℃ 时粗蛋白质量分数也比原料高出 7.4%。再综合 pH 值和物料回收率，选择最适发酵温度为 37 ℃。

2.1.2 料水比对枯草芽孢杆菌发酵豆粕的影响

基质含水量影响培养系统中的氧气供应、气体流动等，是关系到发酵成败的制约因素^[23]。枯草芽孢杆菌是好氧细菌，培养基中的水分过低会导致氧气不足，营养也未能全部溶于水分中，利用率低，而水分太多会导致基质多孔性降低，不利于物料内热量的散发和氧气的传递，影响菌的生长和繁殖^[24]。当料水比（ m/V ）为 1:1 时，粗蛋白质量分数达 54.17%（见图 2a），豆粕感官评价较为突出（见图 2b），并且物料回收率在 90.72%，可以带来可观的经济收益，故最适料水比定为 1:1。

2.1.3 接种量对枯草芽孢杆菌发酵豆粕的影响

接种量适中利于枯草芽孢杆菌的生长与繁殖，利于产生蛋白酶，可以更好地进行发酵^[26]。由图 3 可知，发酵产物感官指标没有明显差异，豆粕均呈褐色，有浓郁的醇香味，黏度高；在接种量为

5% 时, 粗蛋白质量分数达到 55.45%, 其 pH 值与物料回收率较为稳定, 故选择 5% 为最适接种量。

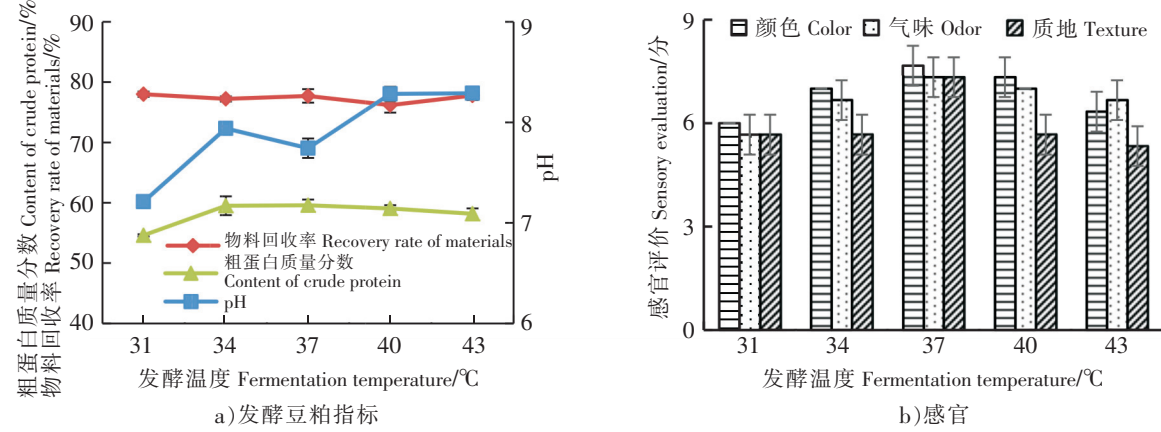


图 1 不同发酵温度对枯草芽孢杆菌发酵豆粕指标和感官的影响

Fig.1 Effect of different temperature on index and sensory of fermented soybean meal by *B. subtilis*

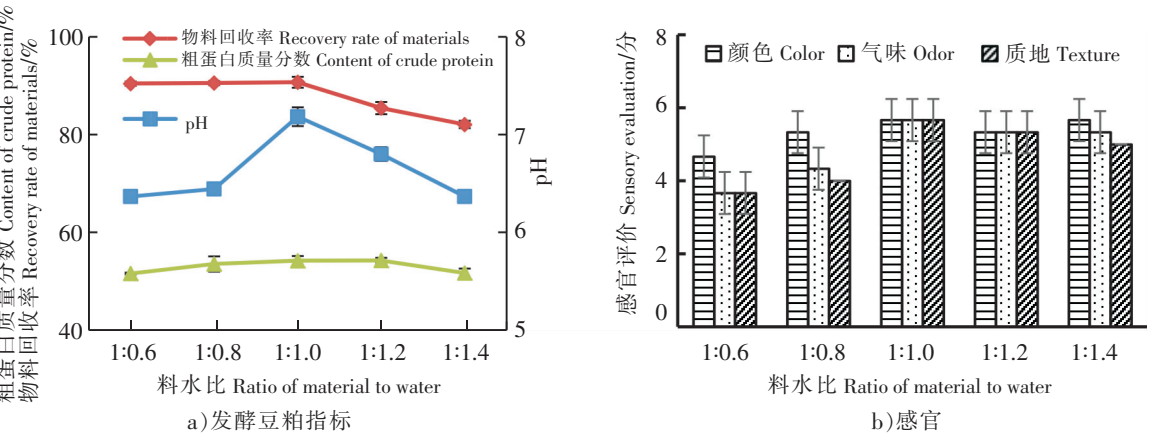


图 2 不同料水比对枯草芽孢杆菌发酵豆粕指标和感官的影响

Fig.2 Effect of different ratio of material to water on index and sensory of fermented soybean meal by *B. subtilis*

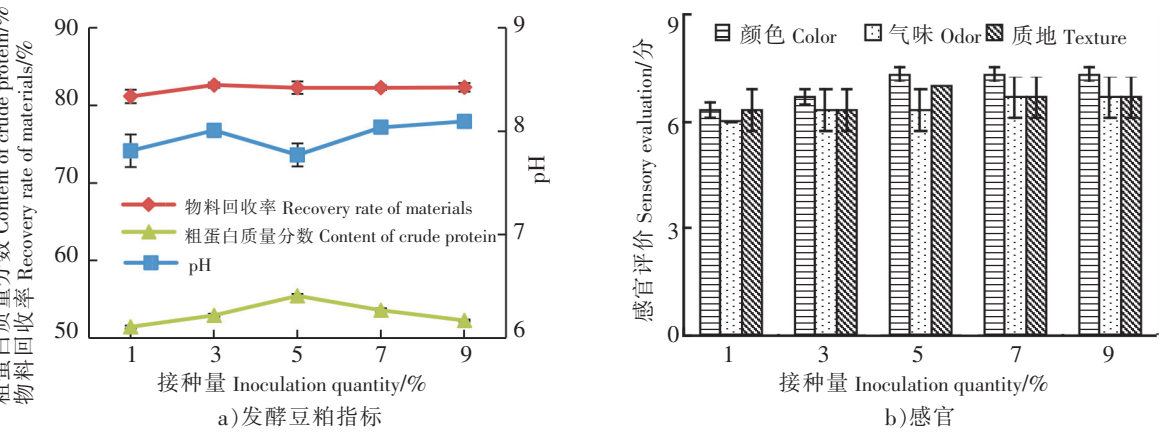


图 3 不同接种量对枯草芽孢杆菌发酵豆粕指标和感官的影响

Fig.3 Effect of different inoculation quantity on index and sensory of fermented soybean meal by *B. subtilis*

2.2 酿酒酵母菌发酵条件的优化

2.2.1 温度对酿酒酵母菌发酵豆粕的影响

过高的温度不利于酿酒酵母的生长，达不到提高发酵豆粕品质的效果^[24]。由图 4 可见，在 34、37 ℃ 两个过高温条件下，酿酒酵母菌发酵豆粕的品质迅速下降，其感官、pH 值和粗蛋白质量分数都接近于未发酵豆粕指标；而在 25 ~ 31 ℃ 适宜温度范围内，豆粕感官方面表现为深黄色，有酵母酒香味，质地也较好。由于微生物作用产酸使 pH 值下降，更符合畜禽动物偏酸性的胃肠道环境，增加了适口性和良好风味。粗蛋白含量增加，较高温发酵时物料回收率稍有下降，均保持在 86.23%，故选择 31 ℃ 为最适发酵温度。

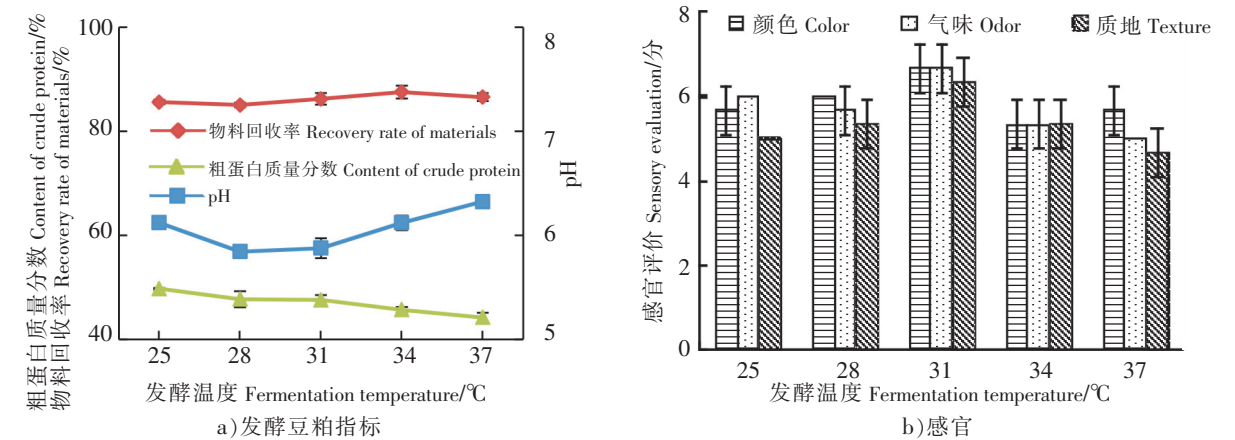


图 4 不同发酵温度对酿酒酵母菌发酵豆粕指标和感官的影响

Fig.4 Effect of different fermentation temperature on index and sensory of fermented soybean meal by *S. cerevisiae*

2.2.2 料水比对酿酒酵母菌发酵豆粕的影响

从图 5 中各项指标来看，料水比不是影响酿酒酵母发酵豆粕的主要因素。在适宜的发 酵温度、时间和接种量条件下，物料水分不论高低（1:0.6 ~ 1:1.4）都有良好的感官效果、适宜的酸度及物料回收率，更重要的是粗蛋白含量较稳定。此条件下酿酒酵母能分泌多种水解酶类，利用豆粕作为氮源，发挥微生物的作用效果，提高蛋白质的利用率^[27]。为保证发酵效果，料水比定为 1:1。

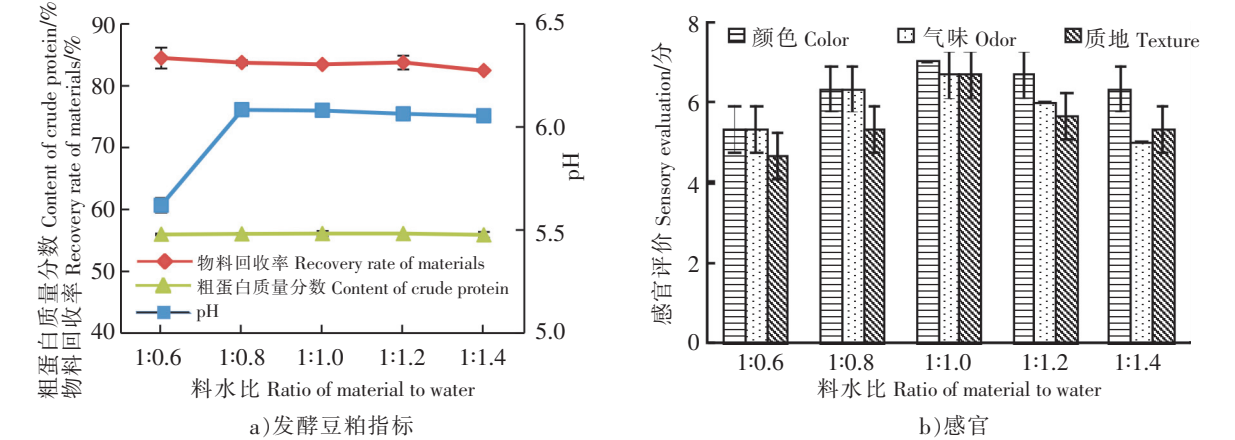


图 5 不同料水比对酿酒酵母菌发酵豆粕指标和感官的影响

Fig.5 Effect of different ratio of material to water on index and sensory of fermented soybean meal by *S. cerevisiae*

2.2.3 接种量对酿酒酵母菌发酵豆粕的影响

由图 6 可知，发酵豆粕的气味和质地评价在接种量偏少或偏多的情况下较差；酵母菌接种量对于

粗蛋白的质量分数影响较大, 在接种量为 5% 时, 粗蛋白质量分数达到 52.69%, 其 pH 值较为稳定。接种量过多会造成微生物对营养的恶性竞争, 过少则在固定时间内微生物种群增长不足。为稳定发酵, 选择 5% 为最优接种量。

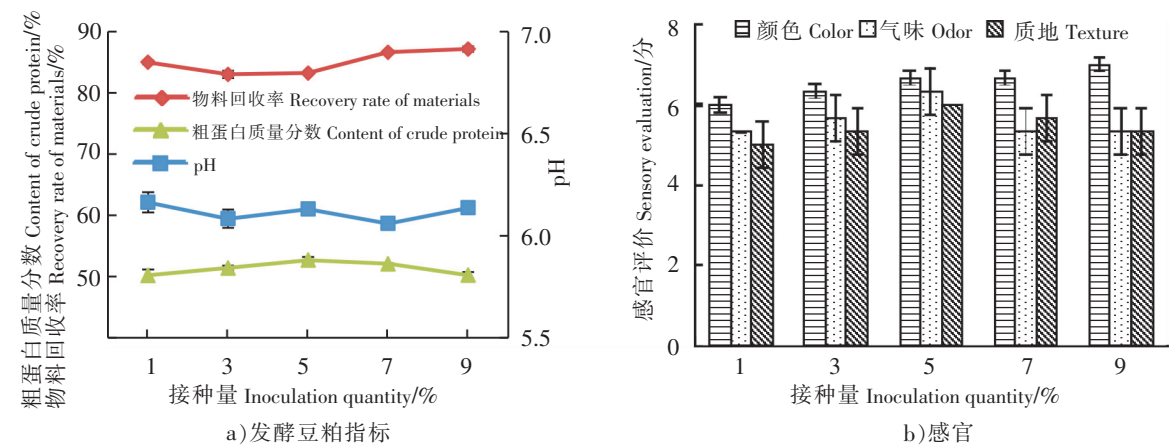


图 6 不同接种量对酿酒酵母菌发酵豆粕指标和感官的影响

Fig.6 Effect of different inoculation quantity on index and sensory of fermented soybean meal by *S. cerevisiae*

2.3 乳酸菌发酵条件的优化

2.3.1 温度对乳酸菌发酵豆粕的影响

由图 7 可得, 乳酸菌发酵豆粕的感官效果、物料回收率和粗蛋白质量分数变化都不明显。乳酸菌能利用基质中的多糖产生大量有机酸, 从而使物料的 pH 值降低; 乳酸菌在较宽温度范围 (20 ~ 43 ℃) 均可生长, 较适宜的生长温度是 30 ~ 40 ℃, 且分泌的酶系需要在适宜温度下才能发挥最强的酶活力, 调控微生物的新陈代谢和营养品质的改善。这与上述实验结果的分析基本一致, 故将 37 ℃ 定为最适发酵温度。

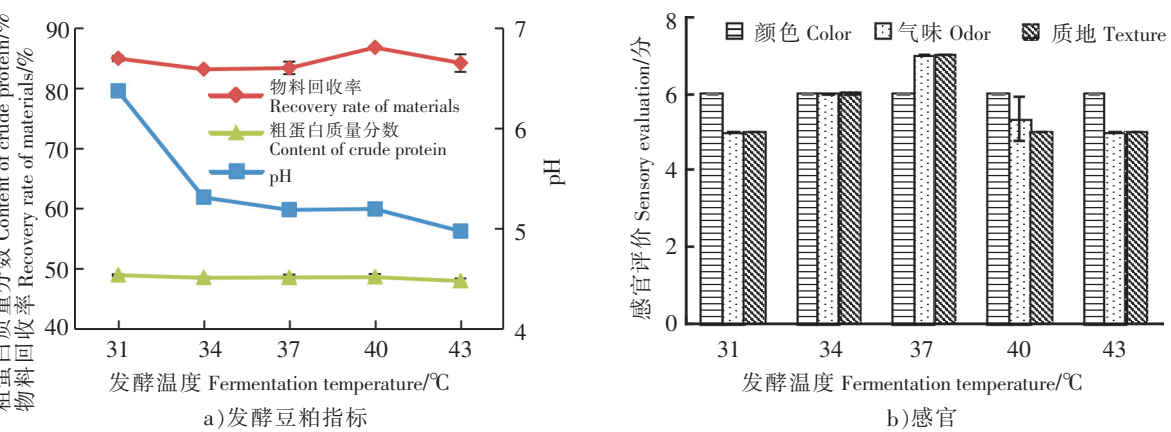


图 7 不同发酵温度对乳酸菌发酵豆粕指标和感官的影响

Fig.7 Effect of different fermentation temperature on index and sensory of fermented soybean meal by *Lactobacillus*

2.3.2 料水比对乳酸菌发酵豆粕的影响

水分含量是影响豆粕固态发酵质量的重要因素, 包被在豆粕表面的水膜能溶解微生物所需的无机盐和代谢产物, 同时为微生物的生长提供所需的潮湿环境^[27]。乳酸菌是厌氧菌, 水分含量高, 物料粘连, 溶氧量减少, 适合乳酸菌发酵。由图 8 可见, 不同料水比条件下, 豆粕呈现酸性, 适于饲料的适口性, 但含水量过高会增加发酵后期的干燥成本, 料水比为 1:1.2 时其粗蛋白质量分数最高达 47%。因此, 发酵豆粕过程中料水比定为 1:1.2。

2.3.3 接种量对乳酸菌发酵豆粕的影响

分析图 9a 中 pH 值、粗蛋白质量分数 2 个指标可知，乳酸菌不同接种量使得发酵豆粕的含酸量、蛋白酶作用效果趋于稳定；乳酸菌主要是利用碳水化合物通过生成的淀粉酶、纤维素酶等作用产酸及其他风味物质，而分泌的蛋白酶系比较少。因此，对豆粕中丰富的蛋白质氮源不能充分利用，蛋白质质量分数也就无法显著提高，粗蛋白含量较低仅为 47%，故选择 5% 为最优接种量。

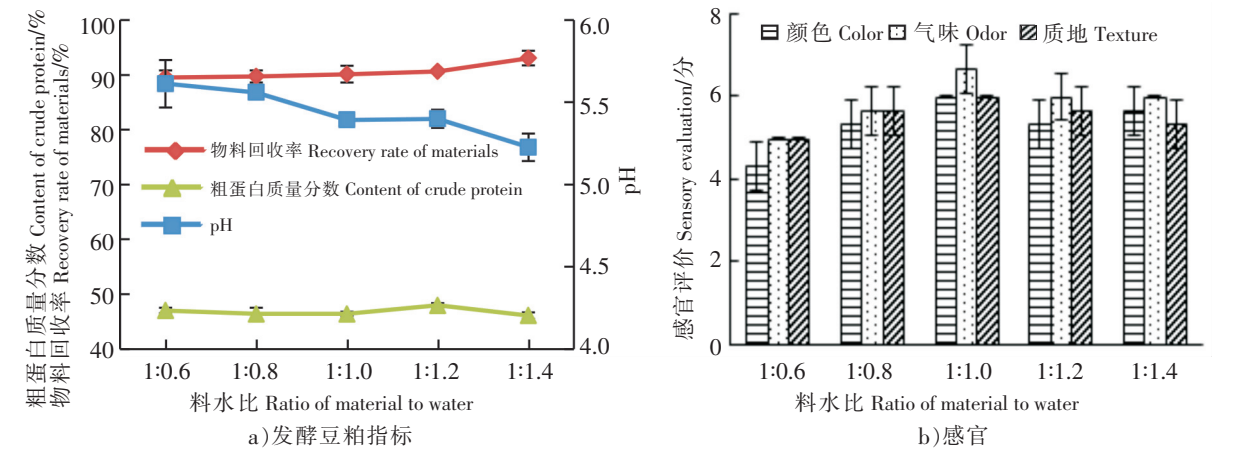


图 8 不同料水比对乳酸菌发酵豆粕指标和感官的影响

Fig.8 Effect of different ratio of material to water on index and sensory of fermented soybean meal by *Lactobacillus*

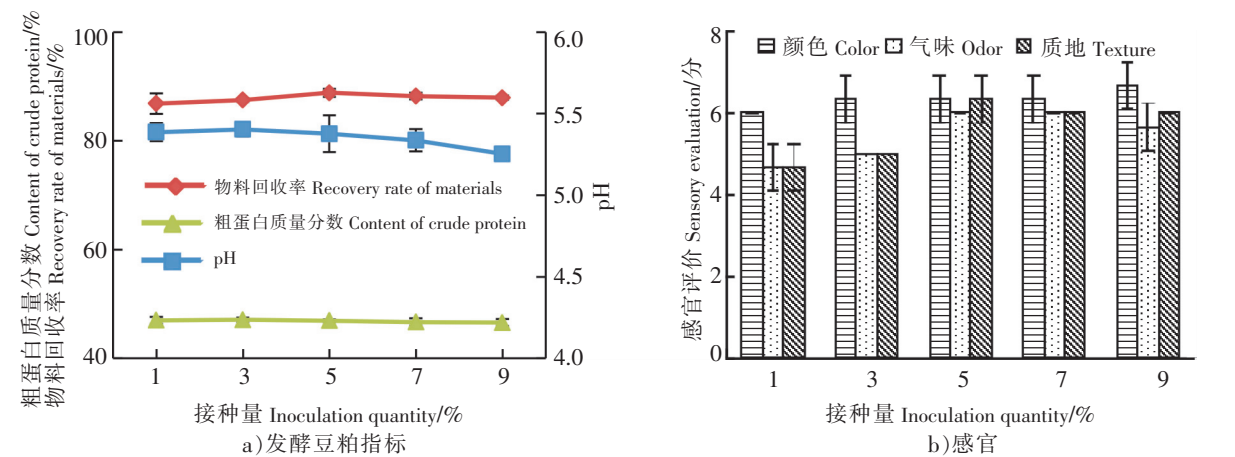


图 9 不同接种量对乳酸菌发酵豆粕指标和感官的影响

Fig.9 Effect of different inoculation quantity on index and sensory of fermented soybean meal by *Lactobacillus*

2.4 单菌动态发酵过程的分析

在筛选最优发酵条件下，研究枯草芽孢杆菌、酿酒酵母菌和乳酸菌在动态发酵过程中对发酵豆粕的效果变化，结果见图 10。由图 10 得到：在最优条件下，不同时间内枯草芽孢杆菌发酵豆粕的总体感官指标优于酿酒酵母菌和乳酸菌，枯草芽孢杆菌发酵后豆粕呈偏酸性的酱香味，感官良好；以酿酒酵母作为优势菌发酵后豆粕具有浓郁的酵母香；以乳酸菌作为优势菌发酵后豆粕具有浓郁的酸香味，呈低酸性，提高了动物饲料的适口性和诱食性。不同益生菌因发酵产生不同酶系，导致枯草芽孢杆菌在发酵 60 h 后 pH 值开始下降且跨度较大。究其原因：在发酵中产生中性蛋白酶和碱性蛋白酶且酶活力较为强盛，发酵豆粕由弱酸性转变为碱性（pH = 8.3）；酵母菌在整个发酵过程中 pH 值变化范围较小呈偏弱酸性。乳酸菌在发酵过程中可产生大量有机酸如乳酸、乙酸和丙酸等，且时间越长作用越明显，这是导致其 pH 值下降的主要因素。不同益生菌在发酵过程中，物料回收率随着时间的增加而下降，张艳萍等^[28]利用粪肠球菌、产朊假丝酵母及枯草芽孢杆菌对豆粕进行发酵，结果发现，发

酵饲料微生物活性越高,干物质回收率越低,可知枯草芽孢杆菌生物活性较高,且粗蛋白含量较高,作为发酵菌株可以较大幅度地保证生产效益。

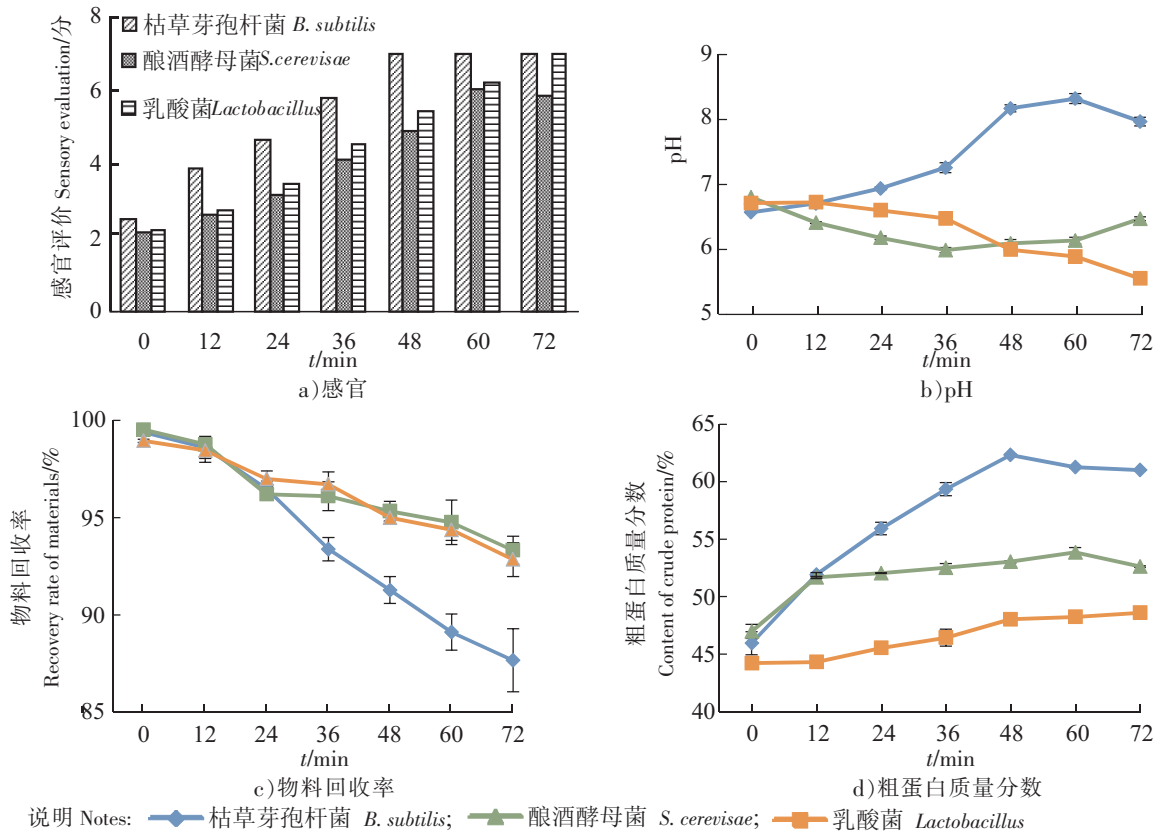


图 10 不同时间对单菌发酵豆粕指标和感官的影响

Fig.10 Effect of different fermentation time on index and sensory of fermented soybean meal with single strain

3 结论

以枯草芽孢杆菌作为单一菌种发酵豆粕最优发酵条件:料水比(m/V)为1:1,接种量为5%,发酵温度为37℃,发酵时间为48h,粗蛋白质量分数达62.3%;以酿酒酵母菌作为单一菌种发酵豆粕最优发酵条件:料水比(m/V)为1:1,接种量为5%,发酵温度为31℃,发酵时间为60h,粗蛋白质量分数达53.8%;以乳酸菌作为单一菌种发酵豆粕最优发酵条件:料水比(m/V)为1:1.2,接种量为5%,发酵温度为37℃,发酵时间为72h,粗蛋白质量分数达48.6%。本实验利用不同益生菌经试验,得到的豆粕品质虽存在差异,但都改善了豆粕的品质。综合考虑物料回收率因素,选择枯草芽孢杆菌为最优发酵益生菌。

[参 考 文 献]

[1] 李建. 发酵豆粕研究进展 [J]. 粮食与饲料工业, 2009(6): 31-35.
[2] 王威, 孙世军, 赵巧义. 固态发酵大豆粕工艺研究现状及其工业应用 [J]. 粮食与油脂, 2013(6): 14-16.
[3] 龙国徽. 大豆蛋白的结构特征与营养价值的关系 [D]. 长春: 吉林农业大学, 2015.
[4] 杨帆. 微生物发酵饲料的作用机理及利用 [J]. 新疆畜牧业, 2014(10): 11-13.
[5] 曹钰, 蔡国林, 陆健. 提高豆粕营养价值的研究进展 [J]. 饲料与畜牧: 新饲料, 2007(6): 13-15.
[6] 何玉华, 严昌国. 豆粕中抗营养因子及其钝化方法 [J]. 吉林农业科技学院学报, 2009, 18(1): 20-21.
[7] 潘进权, 刘玉婷, 刘夏婷. 毛霉发酵豆粕工艺条件的优化 [J]. 食品科学, 2015, 36(23): 178-182.
[8] WANG Y, LIU X T, WANG H L, et al. Optimization of processing conditions for solid-state fermented soybean meal and <http://xuebaobangong.jmu.edu.cn/zkb>

- its effects on growth performance and nutrient digestibility of weanling pigs [J]. *Livestock Science*, 2014, 170: 91-99. DOI:10.1016/J.LIVSCI.2014.07.020.
- [9] ELSHARNOUBY G A, ALEID S M, ALOTAIBI M M. Nutritional quality of biscuit supplemented with wheat bran and date palm fruits (*Phoenix dactylifera* L.) [J]. *Food & Nutrition Sciences*, 2012, 3(3): 322-328. DOI:10.4236/FNS.2012.33047.
- [10] 张吉鸣. 多菌种组合固态发酵法生产大豆肽蛋白饲料 [J]. *江西饲料*, 2011(1): 1-4.
- [11] 熊智辉, 过玉英, 陈丽玲, 等. 微生物发酵处理对豆粕抗营养因子的影响 [J]. *饲料与畜牧*, 2007, 26(3): 396-399.
- [12] 付弘赞. 微生物固态发酵豆粕的研究 [D]. 合肥: 安徽农业大学, 2008.
- [13] MEINLSCHMIDT P, SCHWEIGGERT WEISZ U, EISNER P. Soy protein hydrolysates fermentation: effect of debittering and degradation of major soy allergens [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2016, 71: 202-212. DOI:10.1016/J.LWT.2016.03.026.
- [14] 严鹤松. 黑曲霉发酵豆粕的研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2009.
- [15] 彭松. 发酵豆粕和发酵花生粕在凡纳滨对虾饲料中的应用研究 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2015.
- [16] 中国标准化研究院. 感官分析 食品颜色评价的总则和检验方法: GB/T 21172—2007 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [17] 全国饲料工业标准化技术委员会. 饲料原料 发酵豆粕: NY/T 2218—2012 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [18] 陈萱. 豆粕发酵工艺改进与发酵豆粕功能拓展的研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2005.
- [19] 徐佳璐, 战海枫, 陈义飞. 饲料中粗蛋白测定的方法 [J]. *养殖技术顾问*, 2014(3): 49.
- [20] 国家技术监督局. 饲料中粗蛋白测定方法: GB/T 6432—1994 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
- [21] 胡瑞, 陈艳, 王之盛, 等. 复合益生菌发酵豆粕生产工艺参数的优化及酶菌联合发酵对豆粕品质的影响 [J]. *动物营养学报*, 2013, 25(8): 1896-1903.
- [22] TORO FUNES N, BOSCH FUSTE J, LATORRE MORATALLA M L, et al. Biologically active amines in fermented and non-fermented commercial soybean products from the Spanish market [J]. 2015, 173(173): 1119-1124. DOI:10.1016/J.FOODCHEM.2014.10.118.
- [23] 赵延伟, 王雨生, 陈海华, 等. 响应面法优化豆粕酶解工艺条件 [J]. *食品科学*, 2013, 34(8): 70-75.
- [24] TECHARANG J, APICHARTSRANGKON A. Physical, chemical and rheological parameters of pressurized swai-fish (*Pangasius hypophthalmus*) emulsion incorporating fermented soybeans [J]. *Food & Bioproducts Processing*, 2015, 94: 649-656. DOI:10.1016/J.FBP.2014.09.002.
- [25] CHI C H, CHO S J. Improvement of bioactivity of soybean meal by solid-state fermentation with *Bacillus amyloliquefaciens*, versus *Lactobacillus*, spp. and *Saccharomyces cerevisiae* [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2016, 68: 619-625. DOI:10.1016/J.LWT.2015.12.002.
- [26] 杨学娟. 纳豆芽孢杆菌固体发酵低温豆粕的功能活性及机制研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2013.
- [27] 刘济. 发酵豆粕对 AA 肉鸡生长性能、免疫功能及其消化酶的影响 [D]. 湛江: 广东海洋大学, 2012.
- [28] 张艳萍, 李雪平, 尹望. 不同微生物发酵对豆粕营养品质影响的研究 [J]. *饲料研究*, 2017(1): 19-20.
- [29] 徐力, 田永强, 刘惠琴, 等. 响应面法优化复合菌种发酵豆粕条件 [J]. *大豆科学*, 2016, 35(3): 498-504.

(责任编辑 马建华 英文审校 刘静雯)