

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2022.02.022

任菲, 刘玉春, 王超, 等. 两株高效降解玉米蛋白粉益生菌的发酵特性研究[J]. 粮油食品科技, 2022, 30(2): 183-189.

REN F, LIU Y C, WANG C, et al. Research on fermentation characteristics of two probiotic strains with efficient degradation of corn gluten meal[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2022, 30(2): 183-189.

# 两株高效降解玉米蛋白粉益生菌的 发酵特性研究

任菲, 刘玉春, 王超, 郭超, 张维清

(国家粮食和物资储备局科学研究院, 北京 100037)

**摘要:** 通过固体筛培法从豆酱样品筛选到两株高效降解玉米蛋白粉的菌株 *Bacillus subtilis* HDJ1 和 *Bacillus velezensis* HDJ2。单因素发酵实验表明, 菌株 HDJ1 液态发酵玉米蛋白粉的最佳条件为: 发酵温度 40 °C, pH 8, 接种量 6%, 底物浓度 8%, 转速 200 r/min, 加液体积 40 mL, 发酵时间 72 h; 菌株 HDJ2 液态发酵玉米蛋白粉的最优条件为: 发酵温度 40 °C, pH 6, 接种量 9%, 底物浓度 8%, 转速 150 r/min, 加液体积 120 mL, 发酵时间 72 h; HDJ1 和 HDJ2 等量组合后发酵玉米蛋白粉的最佳条件为: 发酵温度 30 °C, 发酵 pH 8, 接种量 6%, 底物浓度 8%, 转速 250 r/min, 加液体积 40 mL, 发酵时间 96 h。正交实验结果显示: HDJ1、HDJ2、HDJ1 和 HDJ2 等量组合在发酵温度 30 °C, 发酵 pH 8, 接种量 3%, 底物浓度 8%, 转速 200 r/min, 发酵时间 96 h 条件下发酵液可溶蛋白含量最高, 其发酵液冷冻干燥浓缩样品的蛋白酶活、可溶蛋白含量、DPPH 清除率等显著提高, 且两益生菌菌株组合后的发酵效果优于单株菌。

**关键词:** 玉米蛋白粉; 益生菌; 可溶蛋白含量; 发酵特性; 菌株组合

中图分类号: TS201.1 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2022)02-0183-07

## Research on Fermentation Characteristics of Two Probiotic Strains with Efficient Degradation of Corn Gluten Meal

REN Fei, LIU Yu-chun, WANG Chao, GUO Chao, ZHANG Wei-qing

(Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037, China)

**Abstract:** Two microbial strains *Bacillus subtilis* HDJ1 and *Bacillus velezensis* HDJ2 were screened from soybean paste samples by corn gluten meal medium for high protease activity. Single factor fermentation experiment showed that the optimum conditions of liquid fermentation of corn gluten meal for strain HDJ1 were: fermentation temperature of 40 °C, fermentation pH 8, inoculum of 6%, substrate concentration of 8%, rotating speed of 200 r/min, liquid-adding volume of 40 mL, fermentation time of 72 h; The optimum conditions for liquid fermentation of corn gluten meal for strain HDJ2 were: fermentation temperature of 40 °C, fermentation pH 6, inoculum of 9%, substrate concentration of 8%, rotating speed of 150 r/min, liquid-adding volume of 120 mL, fermentation time of 72 h; The optimum conditions for the fermentation of

收稿日期: 2021-10-09

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金课题 (ZX2022)

Supported by: Fundamental Research Funds of non-profit Central Institutes (No. ZX2022)

作者简介: 任菲, 1987 年出生, 女, 博士, 副研究员, 研究方向为粮油微生物资源与利用。E-mail: rf@ags.ac.cn.

corn gluten meal for equal combination of HDJ1 and HDJ2 were: fermentation temperature of 30 °C, fermentation pH 8, inoculum amount of 6%, substrate concentration of 8%, rotating speed of 250 r/min, liquid-adding volume of 40 mL, fermentation time of 96 h. The results of Orthogonal test showed that the content of soluble protein of HDJ1, HDJ2, HDJ1 and HDJ2 was the highest when the fermentation temperature was 30 °C, the fermentation pH was 8, the inoculum amount was 3%, the substrate concentration was 8%, the rotation speed was 200 r/min, and the fermentation time was 96 h. The protease activity, soluble protein content and DPPH scavenging rate of the sample significantly increased after freeze-drying of the microbial fermentation, and the fermentation effect of the two combined stains was better than that of single strain.

**Key words:** corn gluten meal; degradation stains; soluble protein; fermentation characteristics; strain combination

玉米蛋白粉是玉米加工的主要副产物,产量巨大<sup>[1-3]</sup>。但由于其醇溶蛋白含量较高及氨基酸组成不平衡,严重制约其应用,大多被当作饲料原料<sup>[3-5]</sup>。微生物分泌的蛋白酶能将蛋白粉中难溶的植物蛋白质降解并产生具有多种生理活性的肽类,因此,利用微生物发酵过程加工玉米蛋白粉具有广阔应用发展前景<sup>[3-7]</sup>。张智等<sup>[8]</sup>确定了枯草芽孢杆菌 Is-45 制备玉米肽的最佳发酵条件;徐艳阳<sup>[7]</sup>等对纳豆芽孢杆菌水解玉米蛋白粉产玉米肽的工艺进行了优化;文超婷等<sup>[9]</sup>优化了羊肚菌发酵玉米蛋白液体发酵培养条件。但是,目前面临适宜发酵微生物资源认识和开发不足以及相应发酵工艺建立等问题<sup>[3-4]</sup>,尤其是筛选获得高效蛋白酶活性的菌株及相应发酵工艺条件优化成为当前研究的重点。

本研究从传统自然发酵豆酱样品中,通过玉米蛋白粉固体筛培法和福林酚法等分离筛选到高效降解玉米蛋白粉的益生菌,并通过单因素发酵实验和正交实验对单菌株及其菌株组合发酵玉米蛋白粉的条件进行了优化。研究为提升优化微生物发酵玉米蛋白粉的条件工艺及其应用奠定基础。

## 1 材料方法

### 1.1 实验材料

自然发酵豆酱样品:市购;可溶蛋白含量测定试剂盒、DPPH 自由基清除能力试剂盒:苏州格锐思生物科技公司;TIANamp Bacteria DNA Kit:北京天根生化科技有限公司;无水碳酸钠溶液、三氯乙酸溶液、磷酸缓冲液(pH 分别为 4.5、

7.2、9.3):上海麦克林生化科技有限公司;酪蛋白、福林酚:北京索莱宝科技有限公司;配制培养基的各种样品、试剂,均为国产分析纯:国药集团化学试剂有限公司。

### 1.2 仪器与设备

冷冻干燥仪(ALPHA2-4):德国 Chris Marin 公司;pH 计(FE20K):瑞士 METTLER TOLEDO 公司;振荡培养箱(SHK-99-II):北京北方同正生物技术发展有限公司;微型旋涡仪(V2S02S):德国 IKA 公司;酶标仪(SynergvHT):美国 BIOTEK 公司;台式高速冷冻离心机(EPPENDORF 5810R):德国 EPPENDORF 公司;PCR 仪(C1000 Touch):美国 BIORAD 公司。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 菌株筛选、蛋白酶活性测定及菌种鉴定

研究中所用玉米蛋白粉平板筛选培养基,玉米蛋白粉基础发酵培养基及玉米蛋白粉优化发酵培养基参考文献王雨婷等<sup>[3]</sup>,参照相关文献<sup>[3-4]</sup>,菌株筛选采用玉米蛋白粉平板筛选培养基观察并测定菌落周围透明圈的大小;蛋白酶活性测定按照国标福林酚试剂法测定发酵液中上清液的蛋白酶活性;菌株鉴定,提取目标菌株基因组 DNA,PCR 扩增其 16S rDNA,PCR 产物由上海生工生物科技有限公司测序,测序结果采用 DNAMAN 软件序列图谱校对拼接,并在 NCBI 数据库中进行同源序列比对鉴定。

#### 1.3.2 菌株玉米蛋白粉发酵实验

平板活化菌株 HDJ1 和 HDJ2 后接种于 LB 培养基中培养,再将此种子液接种于玉米蛋白粉基

础发酵培养基中,以初始 pH 8.0、接种量 5%、摇床转速 150 r/min、温度 30 °C、培养时间 48 h 为基础初始发酵条件,采用单因素及正交实验对培养基玉米蛋白粉含量、培养基初始 pH、接种量、发酵温度、摇床转速、发酵时间及装液量等工艺参数进行优化。可溶蛋白含量测定采用可溶蛋白含量测定试剂盒。

### 1.3.3 菌株玉米蛋白粉发酵液冷冻干燥及冻干粉生理生化性质测定

对玉米蛋白粉发酵液进行冷冻干燥,先-80 °C 冷冻,经过降温,抽真空和主干燥,温度控制在-75~85 °C之间,压强 0.08 Mpa。

活菌数的测定。平板计数法,取 10 g 样品于装有 90 mL 无菌水的三角瓶中,振荡 20 min,摇匀,稀释到一定的梯度,取三个梯度进行涂布,每个梯度设置 3 组平行,倒置于 37 °C 恒温培养箱中培养,待计数。蛋白酶活的测定采用国标同 1.3.1. DPPH 自由基清除能力通过 DPPH 自由基清除能力试剂盒测定。

### 1.4 数据分析

本文中相关数据计算、处理及作图都利用软件 Microsoft Excel 2019 进行。

## 2 结果与讨论

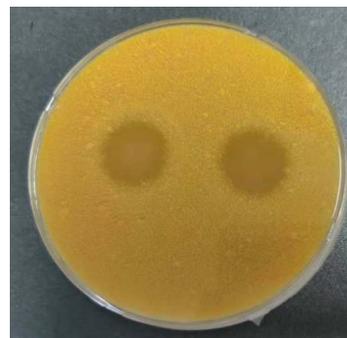
### 2.1 菌株筛选、鉴定及蛋白酶活性测定

从自然发酵豆酱样品中分离筛选到两株出现明显透明水解圈菌株,菌株号分别为 HDJ1 和 HDJ2,其透明水解圈图片见图 1,透明圈(H/C)值分别为 2.2 和 2.4。

基于 16S rDNA 序列的分子鉴定通过 NCBI BLAST 比对确定菌株分类地位。结果显示,筛选获得的细菌菌株 HDJ1 为枯草芽胞杆菌 *Bacillus subtilis*,另一株 HDJ2 为贝莱斯芽胞杆菌 *Bacillus velezensis* (表 1)。

依据国标福林酚试剂法测定了菌株蛋白酶活性(表 1)。从研究结果可看出,菌株具有较高的蛋白酶活性。两菌株间蛋白酶活性比较显示,HDJ1 酸性蛋白酶和中性蛋白酶活性低于 HDJ2,而碱性蛋白酶活性高于 HDJ2,说明 HDJ1 和 HDJ2 有各自更适合分解的蛋白种类。研究还表明两菌株共培养可极大地提升蛋白酶的活性,酸性、中性和碱性蛋白酶活性都有增加,比单菌株蛋白酶活大多提高 1 倍以上。说明菌株组合能改善和提高蛋白分解效率。

芽孢杆菌是国际上普遍应用的生防细菌,是食品生产加工菌,也是微生物饲料和微生物生态制剂的研究热点之一<sup>[10-11]</sup>。枯草芽孢杆菌分布广泛,能够帮助生物防治马铃薯黄疫病等多种病害<sup>[10-11]</sup>,还能够合成分泌蛋白酶、脂肪酶等多种酶类,也是发酵玉米蛋白粉的重要菌株资源<sup>[10-12]</sup>。贝莱斯芽孢杆菌能分泌多种生物活性物质,抑制包括稻瘟病病原菌、梨灰霉在内等多种病原菌,并且促进植物生长;添加于饲料中还可促进动物生长<sup>[13-15]</sup>。本研究中的菌株均有酸性蛋白酶、中性蛋白酶及碱性蛋白酶活性,并且具有显著的组合培养协同提效分解蛋白的作用,应用潜力巨大。



左为菌株 HDJ1, 右为菌株 HDJ2。

left: HDJ1, right: HDJ2.

图 1 菌株在玉米蛋白粉固体筛选培养基上水解透明圈图  
 Fig.1 Hydrolytic transparent circles of microbial strains of corn gluten meal screening medium

表 1 菌株筛选鉴定结果及菌株蛋白酶活性  
 Table 1 Identification of two stains and the protease activity

分离菌号	分离物鉴定	相似性/%	酸性蛋白酶活性	中性蛋白酶活性	碱性蛋白酶活性	U/mL
HDJ1	<i>Bacillus subtilis</i>	99	39.8	89.3	125.9	
HDJ2	<i>Bacillus velezensis</i>	99	72.2	94.1	98.5	
HDJ1+HDJ2	/	/	155.7	227.7	240.2	

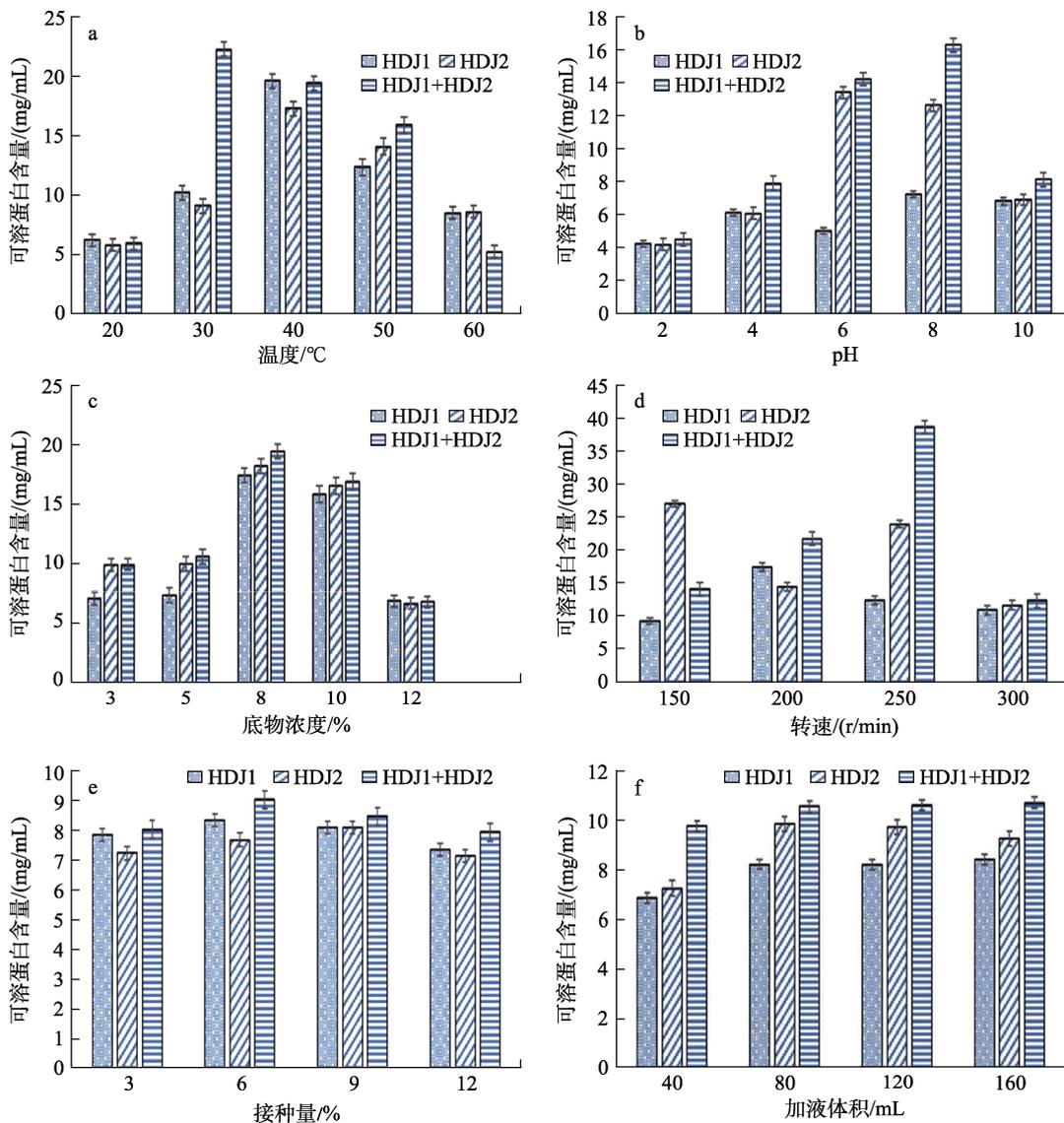
## 2.2 菌株发酵玉米蛋白粉单因素发酵工艺优化

对菌株进行了发酵温度、发酵初始 pH、底物玉米蛋白粉含量、摇瓶转速、菌株接种量及装液量加液体积的发酵玉米蛋白粉单因素发酵条件的优化。HDJ1 和 HDJ2 单菌株在 40 °C 发酵液可溶蛋白含量最高，而组合 (HDJ1+HDJ2, 等量) 发酵液可溶蛋白含量在 30 °C 最高(图 2); 50 °C 时，可溶性蛋白含量仍较高。pH 8 时，HDJ1、HDJ1 和 HDJ2 组合发酵液可溶蛋白含量最高，HDJ2 则在 pH 6 时最高 (图 2)。HDJ1 在接种量 6%，底物浓度 8%，转速 200 r/min，加液体积 40 mL，发酵时间 72 h 可溶蛋白含量最高；HDJ2 在接种量

9%，底物浓度 8%，转速 150 r/min，加液体积 120 mL，发酵时间 72 h 可溶蛋白含量最高；而 HDJ1 和 HDJ2 等量组合在接种量 6%，底物浓度 8%，转速 250 r/min，加液体积 40 mL，发酵时间 96 h 下可溶蛋白含量最高 (图 2 和表 2)。而装液量即加液体积变化不明显，以下选择 80 mL/300 mL 装瓶液量。

## 2.3 菌株发酵玉米蛋白粉发酵正交实验

在单因素实验的基础上，选定底物浓度、种子液的接种量、初始 pH、摇床转速、发酵温度、发酵时间 6 个因素，采用 L18(3<sup>6</sup>) 正交实验设计进行研究 (表 3)。各组正交实验设计和实验数据见表 4 (HDJ1)、表 5 (HDJ2) 及表 6 (HDJ1+HDJ2)。



a. 温度; b. pH; c. 底物浓度 (玉米蛋白粉含量); d. 转速; e. 接种量; f. 装液量 (加液体积)。

a. temperature; b. pH; c. substrate concentration (content of corn gluten meal); d. rotation speed; e. amount of inoculation; f. liquid loading volume (volume of added liquid).

图 2 单因素对可溶蛋白含量的影响

Fig.2 Effect of single factor on soluble protein content

表2 发酵时间单因素表  
 Table 2 Fermentation time factor

HDJ1		HDJ2		HDJ1+HDJ2	
发酵时间/h	可溶蛋白含量/(mg/mL)	发酵时间/h	可溶蛋白含量 t/(mg/mL)	发酵时间/h	可溶蛋白含量 t/(mg/mL)
24	7.8	24	6.9	24	8.9
48	12.5	48	10.5	48	18.4
72	19.6	72	17.7	72	22.2
96	15.8	96	14.1	96	22.5
120	12.2	120	11.9	120	15.3

由正交实验分析表比较各因素对可溶性蛋白含量的极差大小及平均值可看出,不同因素对可溶蛋白含量影响由大到小 HDJ1 为  $R_A > R_E > R_D > R_F > R_B > R_C$ , HDJ2 为  $R_A > R_B > R_E > R_C > R_D > R_F$ 。HDJ1+HDJ2 为  $R_A > R_E > R_D > R_F > R_C > R_B$ 。正交实验结果显示 HDJ1、HDJ2、HDJ1 和 HDJ2 组合在发酵温度 30 °C, 发酵 pH 8, 接种量 3%, 底物浓度 8%, 转速 200 r/min, 发酵时间 96 h 条件下发酵液可溶蛋白含量最高。

表3 L18(3<sup>6</sup>)正交实验设计  
 Table 3 L18(3<sup>6</sup>) Orthogonal experimental design

水平	底物浓度 A/%	PH B	接种量 C/%	转速 D(r/min)	发酵温度 E/°C	发酵时间 F/h
1	5	6	3	150	30	48
2	8	8	6	200	40	72
3	10	10	9	250	50	96

表4 HDJ1 正交实验分析表  
 Table 4 HDJ1 Orthogonal test analysis table

序列号	A	B	C	D	E	F	可溶蛋白含量/(mg/mL)
1	1	1	1	1	1	1	8.1
1	2	2	2	2	2	2	8.8
1	3	3	3	3	3	3	16.1
2	1	1	2	2	3	3	10.5
2	2	2	3	3	1	1	10.3
2	3	3	1	1	2	2	8.6
3	1	2	1	2	2	3	10.7
3	2	3	2	1	3	1	16.1
3	3	1	3	2	1	2	24.4
1	1	3	3	3	2	2	12.0
1	2	1	1	3	3	2	15.4
1	3	2	2	1	1	3	23.2
2	1	3	3	1	3	2	8.2
2	2	2	1	2	1	3	27.7
2	3	1	2	3	2	1	18.3
3	1	3	2	3	1	2	19.3
3	2	1	3	1	2	3	18.7
3	3	2	1	2	3	1	25.4
平均 1	11.46	15.90	15.98	13.80	18.83	15.02	
平均 2	16.15	14.43	16.02	18.13	11.06	14.12	
平均 3	19.33	16.62	14.95	17.50	15.27	17.82	
极差	7.87	2.19	1.07	4.33	7.77	3.70	

表5 HDJ2 正交实验分析表  
 Table 5 HDJ2 Orthogonal test analysis table

序列号	A	B	C	D	E	F	可溶蛋白含量/(mg/mL)
1	1	1	1	1	1	1	9.1
1	2	2	2	2	2	2	9.4
1	3	3	3	3	3	3	16.6
2	1	1	2	2	3	3	11.7
2	2	2	3	3	1	1	14.1
2	3	3	1	1	2	2	27.5
3	1	2	1	2	2	3	11.1
3	2	3	2	1	3	1	16.2
3	3	1	3	2	1	2	23.3
1	1	3	3	3	2	2	20.1
1	2	1	1	3	3	2	16.8
1	3	2	2	1	1	3	21.1
2	1	3	3	1	3	2	11.2
2	2	2	1	2	1	3	28.4
2	3	1	2	3	2	1	20.1
3	1	3	2	3	1	2	21.3
3	2	1	3	1	2	3	20.2
3	3	2	1	2	3	1	24.8
平均 1	14.08	16.87	19.62	17.55	19.55	17.40	
平均 2	17.52	15.28	16.63	19.62	18.07	18.25	
平均 3	22.23	21.68	17.58	16.67	16.22	18.18	
极差	8.15	6.40	2.99	2.95	3.33	0.85	

## 2.4 玉米蛋白粉发酵后发酵液理化生化指标的测定结果

玉米蛋白粉微生物发酵后发酵液进行了冷冻干燥,制成发酵玉米蛋白肽粉。发酵后样品可溶蛋白含量、DPPH 清除率等显著提高,特别是可溶蛋白含量增加明显(表 7),其中 HDJ1+HDJ2 发酵液干燥粉可溶蛋白含量为 231.2 mg/g。水溶性显著提高正是由于发酵过程中微生物分泌的各种蛋白酶类将玉米蛋白粉中难溶的大分子蛋白质降解为分子量较小的多肽,增加了可溶性。

已报道常用于玉米蛋白粉发酵的微生物有芽孢杆菌、米曲霉、黑曲霉等<sup>[1-9]</sup>。王雨婷等<sup>[3]</sup>报道枯草芽孢杆菌菌株 X1-1 在接种量 6%, 发酵温度 36 °C, 转速 180 r/min, 发酵时间 72 h 为其液态

表 6 HDJ1+HDJ2 正交实验分析表  
Table 6 HDJ1+HDJ2 Orthogonal test analysis table

序列号	A	B	C	D	E	F	可溶蛋白含量/ (mg/mL)
1	1	1	1	1	1	1	9.5
1	2	2	2	2	2	2	9.7
1	3	3	3	3	3	3	14.1
2	1	1	2	2	3	3	10.6
2	2	2	3	3	1	1	14.2
2	3	3	1	1	2	2	13.1
3	1	2	1	2	2	3	12.9
3	2	3	2	1	3	1	16.6
3	3	1	3	2	1	2	19.2
1	1	3	3	3	2	2	12.1
1	2	1	1	3	3	2	13.9
1	3	2	2	1	1	3	15.4
2	1	3	3	1	3	2	15.1
2	2	2	1	2	1	3	30.6
2	3	1	2	3	2	1	19.3
3	1	3	2	3	1	2	17.1
3	2	1	3	1	2	3	22.4
3	3	2	1	2	3	1	25.2
平均 1	12.72	15.82	17.35	15.33	17.63	16.12	
平均 2	17.87	15.22	14.78	17.90	14.73	14.67	
平均 3	17.70	17.25	16.15	15.05	15.92	17.50	
极差	5.15	2.03	2.57	2.85	2.90	2.83	

发酵玉米蛋白粉的最佳条件。其发酵液经喷雾干燥得到样品的蛋白酶活为 2 217 U/g, 粗蛋白以及

小肽含量提高了 1.81 倍和 5.35 倍。并提出底物浓度限值可能与发酵底物中含有较高浓度的硫化物从而对微生物的发酵产生抑制作用有关<sup>[3]</sup>。关于硫化物对菌株发酵的抑制作用我们在今后的实验也将进一步研究。向丽蓉等<sup>[16]</sup>通过单因素和正交实验, 发现黑曲霉 L289 在培养时间 5 d, 温度 34 °C, 装液量 40 mL, 底物浓度 5%下发酵最佳, 发酵液中氨基酸含量达 2 718.05 μg/mL。另有研究对纳豆芽孢杆菌及羊肚菌等单菌株发酵条件进行了优化<sup>[7,9]</sup>。关于复合菌发酵玉米蛋白粉研究, 魏炳栋等<sup>[17]</sup>对复合菌(黑曲霉、乳酸菌、酵母菌和地衣芽孢杆菌)发酵玉米蛋白粉的条件进行优化, 通过正交实验研究发现最优接种比例为地衣芽孢杆菌 4%、乳酸菌 4%、酵母菌 6%、黑曲霉 6%, 发酵温度 35 °C、发酵时间 84 h、含水量 45%、初始 pH 为 6 为最佳发酵条件, 在此条件下多肽得率可达 44.03%。筛选获得高蛋白酶活性的菌株资源及相应发酵工艺条件优化是微生物发酵玉米蛋白粉研究的重点, 是后续菌株改造和投入应用的基础, 还需加强相关研究。而本研究中两菌株发酵效果优于单菌株也提示我们今后进一步对菌株间相互作用关系和作用机理进行探究。

表 7 玉米蛋白粉发酵前后生化指标对比  
Table 7 Comparison of biochemical indexes of corn gluten meal before and after fermentation

水平	益生菌 (cfu/g)	蛋白酶活性 (U/g)	可溶蛋白含量 (mg/g)	氨基酸含量 (μg/g)	DPPH 清除率 (0.01g/mL)/%
玉米蛋白粉原料	0	0	6.3	216.1	32
HDJ1 发酵液干燥粉	1.5*10 <sup>8</sup>	3 380.5	195.8	2 107.1	84
HDJ2 发酵液干燥粉	5*10 <sup>8</sup>	2 579.2	207.4	2 212.2	81
HDJ1+HDJ2 发酵液干燥粉	1.2*10 <sup>9</sup>	3 776.3	231.2	3 298.7	90

### 3 结论

筛选玉米蛋白粉高效降解益生菌, 利用益生菌发酵玉米蛋白粉产肽的研究和其发酵工艺条件的优化具有重要的意义。本研究通过固体筛培法筛选到两株玉米蛋白粉高效降解菌株 HDJ1 和 HDJ2。通过单因素发酵实验优化 HDJ1 菌株、HDJ2 菌株、及 HDJ1 和 HDJ2 等量组合液态发酵玉米蛋白粉的最佳条件(可溶蛋白含量最高条件)。正交实验结果显示 HDJ1、HDJ2、HDJ1 和 HDJ2 等量组合在发酵温度 30 °C, 发酵 pH 8, 接种量 3%, 底物浓度 8%, 转速 200 r/min, 发酵时

间 96 h 条件下发酵液可溶蛋白含量最高。经益生菌菌株发酵后发酵液冷冻干燥后样品蛋白酶活、可溶蛋白含量、DPPH 清除率等显著提高, 并且两菌株组合后的发酵效果优于单菌株。通过本研究也证实了微生物发酵的确能提高可溶蛋白含量。后续将进一步进行玉米蛋白粉益生菌发酵产玉米肽的研究和优化发酵工艺的探索, 以期将为玉米加工副产物蛋白粉的增值利用奠定基础。

### 参考文献:

[1] ZHU B, HE H, HOU T. A comprehensive review of corn

- protein-derived bioactive peptides: production, characterization, bioactivities, and transport pathways[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2019, 18: 329-345.
- [2] LI G, LIU W, WANG Y, et al. Functions and applications of bioactive peptides from corn gluten meal[M]. *Advances in food and nutrition research*. Academic Press, 2019, 87: 1-41.
- [3] 王雨婷, 缪礼鸿, 周凤鸣, 等. 一株高效降解玉米蛋白粉枯草芽孢杆菌的筛选及其发酵特性研究[J]. *饲料工业*, 2017, 38(21): 49-56.  
WANG Y T, MIAO L H, ZHOU F M, et al. An efficient degradation of corn gluten meal *Bacillus subtilis* screening and fermentation characteristics research[J]. *Feed Industry*, 2017, 38(21): 49-56.
- [4] 任菲, 刘玉春, 王超, 等. 高效降解玉米蛋白粉益生菌筛选及生长特性研究[J]. *粮油食品科技*, 2021, 29(3): 183-191.  
REN F, LIU Y C, WANG C, et al. Screening and growth characteristics of probiotics for high efficient degradation of corn gluten meal[J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2021, 29(3): 183-191.
- [5] 李艳娟, 李书国. 玉米生物活性肽的制备及功能和食品的研究进展[J]. *粮食与饲料工业*, 2014, 12(6): 41-44.  
LI Y J, LI S G. Research progress on preparation and biological activity of bioactive peptides derived from corn gluten and its functional foods[J]. *Cereal & Feed Industry*, 2014, 12(6): 41-44.
- [6] 曹慧英, 柴媛, 肖志刚, 等. 玉米活性肽的研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2019, 10(19): 6587-6591.  
CAO H Y, CHAI Y, XIAO Z G, et al. Research progress of corn active peptide[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2019, 10(19): 6587-6591.
- [7] 徐艳阳, 朱志红, 李晴, 等. 纳豆菌发酵玉米蛋白粉制备玉米肽工艺优化[J]. *食品研究与开发*, 2014, (19): 75-79.  
XU Y Y, ZHU Z H, LI Q, et al. Optimization of fermentation process for polypeptide from corn protein powder via *Bacillus Natto*[J]. *Food Research and Development*, 2014, (19): 75-79.
- [8] 张智, 黄放, 朱宏亮, 等. 枯草芽孢杆菌 Is-45 发酵法制取玉米肽的研究[J]. *中国粮油学报*, 2009, 24(12): 36-41.  
ZHANG Z, HUANG F, ZHU H L, et al. Production of corn peptide by fermentation with *Bacillus subtilis* Is-45[J]. *Journal of the Chinese Cereal and oils Association*, 2009, 24(12): 36-41.
- [9] 文超婷, 郑明珠, 修琳, 等. 羊肚菌生物转化玉米醇溶蛋白液体发酵工艺优化[J]. *中国粮油学报*, 2016, 31(2): 103-108.  
WEN C T, ZHENG M Z, XIU L, et al. Optimization of liquid fermentation technology for zein bioconverted by *Morchella Esculenta*[J]. *Journal of the Chinese Cereal and oils Association*, 2016, 31(2): 103-108.
- [10] 马佳, 李颖, 胡栋, 等. 芽孢杆菌生物防治作用机理与应用研究进展[J]. *中国生物防治学报*, 2018, 34(4): 639-648.  
MA J, LI Y, HU D, et al. Progress on mechanism and applications of *Bacillus* as a biocontrol microbe[J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2018, 34(4): 639-648.
- [11] 程洪斌, 刘晓桥, 陈红漫. 枯草芽孢杆菌防治植物真菌病害研究进展[J]. *上海农业学报*, 2006, 22(1): 109-112.  
CHENG H B, LIU X Q, CHEN H M. Research advance in controlling plant fungous diseases by *Bacillus subtilis*[J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2006, 22(1): 109-112.
- [12] JIANG X, CUI Z C, WANG L H, et al. Production of bioactive peptides from corn gluten meal by solid-state fermentation with *Bacillus subtilis* MTCC5480 and evaluation of its antioxidant capacity in vivo[J]. *LWT-Food science and technology*, 2020, doi: 10.1016/j.lwt.2020.109767.
- [13] RABBEE M, ALI M, CHOI J, et al. *Bacillus velezensis*: A valuable member of bioactive molecules within plant microbiomes[J]. *Molecules*, 2019, 24, doi: 10.3390/molecules 24061046.
- [14] 沙月霞, 隋书婷, 曾庆超, 等. 贝莱斯芽孢杆菌 E69 预防稻瘟病等多种真菌病害的潜力[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(11): 1908-1917.  
SHA Y X, SUI S T, ZENG Q C, et al. Biocontrol potential of *Bacillus velezensis* strain E69 against rice blast and other fungal diseases[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(11): 1908-1917.
- [15] 刘韶娜, 张斌, 相德才, 等. 贝莱斯芽孢杆菌对猪生长性能、微生物群落和代谢产物的影响[J]. *动物营养学报*, 2020, 32(12): 139-152.  
LIU S N, ZHANG B, XIANG D C, et al. Effects of *Bacillus velezensis* on growth performance, fecal microbiota and metabolites in pigs[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2020, 32(12): 139-152.
- [16] 向丽蓉, 刘博伦, 田云, 等. 微生物法水解玉米蛋白粉的工艺研究[J]. *湖南农业科学*, 2019, (9): 71-74.  
XIANG L R, LIU B L, TIAN Y, et al. Study on the technology of hydrolyzing corn protein powder by microbial method[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2019, (9): 71-74.
- [17] 魏炳栋, 苗国伟, 陈群, 等. 复合菌发酵玉米蛋白粉的条件优化[J]. *中国畜牧兽医*, 2017, 44(10): 2944-2950.  
WEI B D, MIAO G W, CHEN Q, et al. Optimization of fermentation conditions for corn gluten meal by mixed strains[J]. *China Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2017, 44(10): 2944-2950. ㊟
- 备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lspkj.ijournal.cn>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。