

乳酸菌发酵茶花粉对 α -葡萄糖苷酶抑制率的影响

Effects of lactic acid bacteria fermented pollens on the inhibition of α -glucosidase

罗粤鹏¹ 杨远帆^{1,2,3} 于洋君¹ 何君竹¹ 伍菱^{1,2,3}

LUO Yue-peng¹ YANG Yuan-fan^{1,2,3} YU Yang-jun¹ HE Jun-zhu¹ WU Ling^{1,2,3}

(1. 集美大学海洋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. 厦门市食品生物工程技术研究中心, 福建 厦门 361021)

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

2. Fujian Provincial Key Laboratory of Food Microbiology and Enzyme Engineering, Xiamen, Fujian 361021, China; 3. Research Center of Food Biotechnology of Xiamen City, Xiamen, Fujian 361021, China)

摘要:目的:提高茶花粉 α -葡萄糖苷酶抑制率。方法:以 α -葡萄糖苷酶抑制率为指标,采用响应面法优化乳酸菌接种量、发酵温度及发酵时间对茶花粉发酵效果的影响。结果:复合乳酸菌接种量对 α -葡萄糖苷酶抑制率影响最大,其次是发酵温度。发酵茶花粉的最优工艺条件为乳酸菌接种量0.9%、发酵温度37℃,发酵时间3d,该条件下茶花粉发酵液对 α -葡萄糖苷酶的抑制率为38.97%,是未发酵的3.11倍。结论:试验优化的乳酸菌发酵茶花粉工艺操作简单,能显著提高 α -葡萄糖苷酶抑制率。

关键词:茶花粉;发酵; α -葡萄糖苷酶;乳酸菌;抑制率

Abstract: Objective: This study focus on improving the α -glucosidase inhibition rate of Camellia pollens. **Methods:** Using α -glucosidase inhibition rate as the index, the response surface methodology was used to optimize the effects of lactic acid bacteria inoculation amount, fermentation temperature and fermentation time on the results of Camellia pollens fermentation. **Results:** It was found that the number of lactic acid bacteria inoculated had the greatest effect on α -glucosidase inhibition, followed by fermentation temperature. The optimized fermentation conditions of Camellia pollens were 0.9% lactic acid bacteria inoculation at 37℃ for 3 days. Under the control of the optimized conditions, the inhibition rate of α -glucosidase in Camellia pollens fermentation liquid was 38.97%, which was 3.11 times of that from the unfermented Camellia pollens. **Conclusion:** The experimentally optimized process of lactic acid bacteria fermentation of Camellia pollens was simple to operate and could significantly improve the α -glucosidase inhibition rate.

Keywords: Camellia pollens; fermentation; α -glucosidase; lactic acid bacteria; inhibitory rate

抑制 α -葡萄糖苷酶活性是控制餐后血糖及降低糖尿病的重要手段^[1]。蜂花粉是蜜蜂采集的花粉与蜜蜂特殊的腺体分泌物天然凝集形成的一种不规则扁圆混合物,富含碳水化合物、蛋白质、维生素和多酚等活性成分^[2],具有抑制 α -葡萄糖苷酶的作用,能够有效控制餐后血糖升高,达到延缓和控制糖尿病的效果^[3],使用蜂花粉抑制 α -葡萄糖苷酶是近年来的热点研究^[4]。

蜂花粉包括茶花粉、荷花粉、油菜花粉和玉米花粉等,其中茶花粉是中国大宗蜂花粉之一,营养丰富、功效全面,备受消费者青睐,其还原糖含量为36.25%,蛋白质含量为31.53%,脂肪含量为7.27%,多酚、黄酮含量丰富^[5-6]。研究^[7]发现,蜂花粉表层具有坚固的花粉壁,壁上的萌发孔通常为封闭状态,导致花粉细胞中活性成分难以溶出,造成花粉活性物质的生物利用率较低。此外,蜂花粉中还存在风媒花粉、昆虫唾液中的蛋白质及霉菌等致敏性物质,导致易敏人群产生花粉过敏症,制约蜂花粉的质量安全^[8]。目前提高花粉活性物质生物利用度的研究方法主要有粉碎破壁法^[9]、酶处理法^[10]及微生物发酵法^[11]等,其中微生物发酵法发酵条件温和、高效、容易操作、安全性高,能够在发酵过程中产生分泌酶,通过酶的作用打通花粉壁的萌发孔,促进生物活性物质的溶出。同时,微生物发酵可通过代谢水解蛋白质过敏原,减少或消除食物过敏原^[12]。因此,微生物发酵是提高蜂花粉活性及降低其致敏性的重要方法。

乳酸菌是能从碳水化合物发酵过程中产生乳酸的一类细菌的总称,主要包括乳杆菌属、双歧杆菌属及乳球菌属等^[13],目前被广泛应用于乳制品、果蔬发酵制品及酿酒

作者简介:罗粤鹏,女,集美大学在读硕士研究生。

通信作者:伍菱(1974—),女,集美大学实验师。

E-mail: wuling@jmu.edu.cn

收稿日期:2021-11-25 改回日期:2022-04-23

工业中^[14]。Vilma 等^[15]研究表明,鼠李糖乳杆菌发酵蜂花粉对于花粉中的酚类化合物具有显著的促进作用。Sun 等^[16]认为微生物发酵水解植食性植物原料后,其酚类物质含量和抗氧化活性的改变可能受到微生物种类、发酵温度及原料种类等多种因素的影响。课题组^[6]前期研究发现,经嗜热链球菌和植物乳杆菌发酵后,茶花粉的水提物对 α -葡萄糖苷酶的 IC_{50} 值由 49.09 mg/mL 降至 38.79 mg/mL,表明乳酸菌发酵后的茶花粉能提高 α -葡萄糖苷酶抑制活性。王聪等^[17]采用蜂粮来源的乳酸菌 *Lactobacillus* sp. strain 2-3 发酵油菜花粉,在最优感官评分发酵条件下其总酚含量和 DPPH 自由基清除能力相较于对照组显著提高,杨文超等^[18]以乳酸菌活菌数和感官评分为试验指标优化蜂花粉的发酵工艺,优化后其适口性得到改善。目前以 α -葡萄糖苷酶抑制率为指标的蜂花粉发酵工艺优化研究尚未见报道。

研究拟以茶花粉为原料,考察复合乳酸菌粉(干酪乳杆菌、嗜酸乳杆菌、鼠李糖乳杆菌、植物乳杆菌、青春双歧杆菌、乳双歧杆菌)接种量、发酵温度及发酵时间对 α -葡萄糖苷酶抑制率的影响,旨在为发酵法提高茶花粉对 α -葡萄糖苷酶抑制率提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

茶花粉:北京市华林蜂业有限公司;

α -葡萄糖苷酶(G0660-750UN)、对硝基苯基- α -D-吡喃葡萄糖苷(pNPG):美国 Sigma 公司;

磷酸氢二钾、磷酸二氢钾:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

复合乳酸菌菌粉 $[1 \times 10^{10}$ CFU/g,包括干酪乳杆菌(*Lactobacillus casei*)、嗜酸乳杆菌(*Lactobacillus Acidophilus*)、鼠李糖乳杆菌(*Lactobacillus Rhamnosus*)、婴儿乳杆菌(*Bifidobacterium infantis*)、青春双歧杆菌(*Bifidobacterium Adolensentis*)、乳双歧杆菌(*Bifidobacterium lactis*)] :陕西森弗天然制品有限公司。

1.1.2 主要仪器设备

分析天平:BS223 型,赛多利斯科学仪器有限公司;

高速万能粉碎机:FW80 型,天津市泰斯特仪器有限公司;

分光光度计:Unico®7200 型,上海尤尼柯仪器有限公司;

台式离心机:TDL-40B 型,上海飞鸽仪器厂;

数显恒温水浴锅:HH-4 型,上海精宏实验设备有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 茶花粉发酵工艺 茶花粉低温干燥后,粉碎过 80 目筛备用,准确称取茶花粉 2.0 g,以料液比($m_{\text{茶花粉}} : V_{\text{无菌水}}$) 1 : 20 (g/mL) 加入无菌水,115 °C 高压灭菌 20 min,冷却至室温,接种一定比例的乳酸菌菌粉进行发

酵,100 °C 灭菌,5 000 r/min 离心 20 min,取上清液^[6]。

1.2.2 乳酸菌接种量对 α -葡萄糖苷酶抑制率的影响 固定发酵温度 37 °C,发酵时间 3 d,考察乳酸菌菌粉接种量(0.2%,0.4%,0.6%,0.8%,1.0%)对 α -葡萄糖苷酶抑制率的影响。

1.2.3 发酵温度对 α -葡萄糖苷酶抑制率的影响 固定乳酸菌菌粉接种量 0.8%,发酵时间 3 d,考察发酵温度(28,31,34,37,40 °C)对 α -葡萄糖苷酶抑制率的影响。

1.2.4 发酵时间对 α -葡萄糖苷酶抑制率的影响 固定乳酸菌接种量 0.8%,发酵温度 37 °C,考察发酵时间(1,2,3,4,5 d)对 α -葡萄糖苷酶抑制率的影响。

1.2.5 响应面优化 以乳酸菌接种量、发酵温度、发酵时间为试验因素,应用 Design-Expert 8.06 软件中 Box-Behnken 设计三因素三水平的响应面试验,根据试验结果确定乳酸菌发酵茶花粉的最适工艺条件。

1.2.6 α -葡萄糖苷酶抑制率的测定 参照 Qi 等^[19]的方法。按式(1)计算 α -葡萄糖苷酶抑制率。

$$R = \left(1 - \frac{a-b}{c-d}\right) \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

R —— α -葡萄糖苷酶抑制率,%;

a ——样品组吸光度值;

b ——样品空白组吸光度值;

c ——对照组吸光度值;

d ——空白组吸光度值。

1.3 数据处理

采用 Excel 软件制图,采用 SPSS 19.0 软件对数据进行显著性检验($P < 0.05$)。采用 Design Expert 8.0.6 软件进行响应面试验设计和结果分析,所有试验平行 3 次。

2 结果与分析

2.1 乳酸菌接种量对 α -葡萄糖苷酶抑制率的影响

由图 1 可知,随着乳酸菌接种量的增加,茶花粉发酵液对 α -葡萄糖苷酶的抑制率先增大后减小,并在添加量接近 0.8% 时达最高。当乳酸菌接种量为 1.0% 时,抑制率显著降低,是由于发酵体系中的葡萄糖等营养物质不足以提供乳酸菌生长所需要的能量,导致乳酸菌生长变慢。因此,乳酸菌适宜接种量确定为 0.8% 左右。

2.2 发酵温度对 α -葡萄糖苷酶抑制率的影响

由图 2 可知,随着发酵温度的升高,茶花粉发酵液对 α -葡萄糖苷酶的抑制率呈先上升后下降的趋势,当发酵温度为 37 °C 时,抑制率高达 35.28%。因此,适宜发酵温度为 37 °C 左右。

2.3 发酵时间对 α -葡萄糖苷酶抑制率的影响

由图 3 可知,茶花粉发酵液对 α -葡萄糖苷酶的抑制率随发酵时间的增加先升高后下降。发酵第 3 天的抑制率最高(为 36.61%),比未发酵的提高了 92.48%。当发酵时间 > 3 d 时,抑制率随发酵时间的增加而逐渐降低,与韩璿等^[20]的结果相似,因此适宜的发酵时间为 3 d 左右。

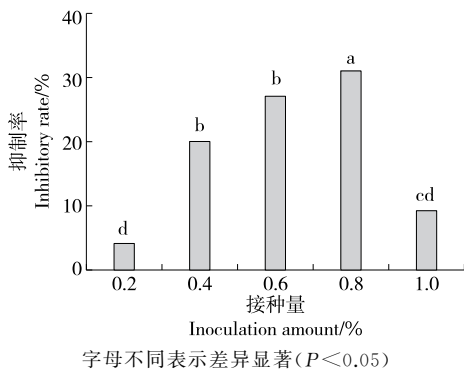


图 1 复合乳酸菌菌粉接种量对 α -葡萄糖苷酶抑制率的影响

Figure 1 Effect of compound lactic acid bacteria powder inoculation amount on the α -glucosidase inhibition rate

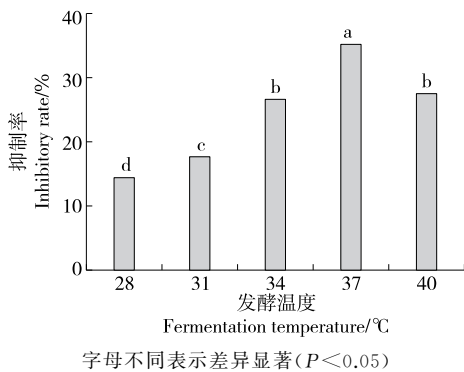


图 2 发酵温度对 α -葡萄糖苷酶抑制率的影响

Figure 2 Effect of fermentation temperature on the α -glucosidase inhibition

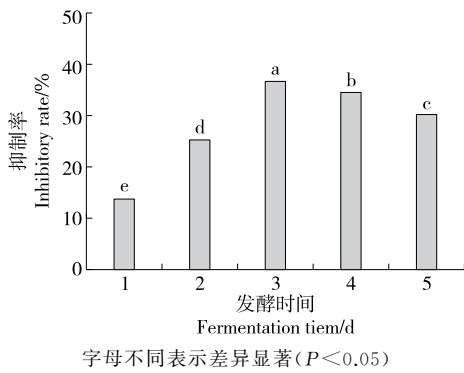


图 3 发酵时间对 α -葡萄糖苷酶抑制率的影响

Figure 3 Effect of lactic acid bacteria fermentation time on the α -glucosidase inhibition rate

2.4 响应面优化试验

根据单因素试验结果,以乳酸菌接种量、发酵温度和发酵时间为响应因素,进一步采用 Design Expert 8.0.6 软件中的 Box-Behnken 设计,以 α -葡萄糖苷酶抑制率作为响应值,对乳酸菌发酵茶花粉工艺进行优化。响应面试验因素和水平见表 1,试验设计及结果见表 2。

采用 Box-Behnken 设计多元回归拟合得到 α -葡萄糖苷酶抑制率(Y)与各因素的回归方程为:

$$Y = 38.46 + 3.56A + 2.40B + 2.38C + 1.22AB + 5.10AC - 1.84BC - 4.23A^2 - 10.28B^2 - 9.38C^2. \quad (2)$$

由表 3 可知,模型 F 值为 18.48 ($P < 0.01$),极显著,失拟项 $P > 0.05$,说明回归方程拟合情况良好^[21]。一次项 B、C,交互项 AB 及二次项 A^2 对 α -葡萄糖苷酶抑制率影响显著 ($P < 0.05$),一次项 A,交互项 AC 及二次项 B^2 、 C^2 对 α -葡萄糖苷酶抑制率影响极显著 ($P < 0.01$)。由 F 值可知,各因素对 α -葡萄糖苷酶抑制率的影响程度为乳酸菌接种量(A) > 发酵温度(B) > 发酵时间(C)。模型相关系数 ($R^2 = 0.9734$) 和校正相关系数 ($R_{adj}^2 = 0.9392$) 均 > 0.9 ,表明该模型可客观反映试验结果。信噪比 > 4 ,表明该模拟可信并且可用于拟合试验结果^[22]。

由图 4 可知,各响应曲面向下且顶点均在试验水平范围之内,说明 α -葡萄糖苷酶抑制率最强的优化条件在试验的水平范围内。所有响应面图皆呈凸面体,表明各因素水平的选择范围较合理,且乳酸菌接种量、发酵温度和发酵时间对 α -葡萄糖苷酶的抑制作用均呈先增大后减

表 1 响应面试验因素和水平

Table 1 Factors and levels in the response surface methods

水平	A 乳酸菌接种量/%	B 发酵温度/°C	C 发酵时间/d
-1	0.6	34	2
0	0.8	37	3
1	1.0	40	4

表 2 响应面试验设计及结果

Table 2 Design of Box-Behnken experiment and results

试验号	A	B	C	α -葡萄糖苷酶抑制率/%
1	0	-1	1	18.88
2	-1	0	1	19.93
3	0	-1	-1	11.19
4	0	1	1	22.73
5	0	0	0	37.06
6	1	1	0	30.77
7	0	1	-1	22.38
8	-1	0	-1	24.62
9	0	0	0	37.76
10	0	0	0	40.56
11	1	0	1	35.28
12	-1	-1	0	19.58
13	-1	1	0	19.23
14	1	0	-1	19.58
15	1	-1	0	26.22

表 3 方差分析结果[†]

Table 3 ANOVA of regression analysis

来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	1 010.84	9	112.32	18.48	0.002 5	**
A	101.52	1	101.52	16.70	0.009 5	**
B	46.23	1	46.23	7.61	0.039 9	*
C	45.39	1	45.39	7.47	0.041 1	*
AB	5.99	1	5.99	0.99	0.036 3	*
AC	103.88	1	103.88	17.09	0.009 0	**
BC	13.48	1	13.48	2.22	0.196 6	
A ²	65.93	1	65.93	10.85	0.021 6	*
B ²	390.44	1	390.44	64.25	0.000 5	**
C ²	325.08	1	325.08	53.49	0.000 7	**
残差	30.39	5	6.08			
失拟项	23.53	3	7.84	2.29	0.318 7	
纯误差	6.86	2	3.43			
总和	1 041.23	14				

[†] * 表示影响显著 ($P < 0.05$), ** 表示影响极显著 ($P < 0.01$); $R^2 = 0.973\ 4$, $R^2_{\text{adj}} = 0.939\ 2$ 。

小的趋势。其中,乳酸菌接种量对应的变化曲面较发酵温度的更陡峭,说明乳酸菌接种量比发酵温度对抑制率的影响更显著。乳酸菌接种量对应的变化曲面比发酵时间对应的更陡峭,说明乳酸菌接种量比发酵时间对抑制率的影响更显著。发酵温度的变化曲面比发酵时间的更陡峭,说明发酵温度相较于发酵时间对抑制率的影响更显著。

乳酸菌接种量与发酵温度的交互作用显著 ($P < 0.05$),两因素间存在促进作用;乳酸菌接种量与发酵时间的交互作用极显著 ($P < 0.01$);发酵时间与发酵温度的等高线图接近于圆形,表明这两个因素的交互作用对抑制率影响不显著,两因素间无明显促进作用,与方差分析结果相符。

2.5 最佳发酵工艺的确定及验证

利用 Design-Expert 8.0.6 软件分析优化得到最佳条件为乳酸菌接种量 0.92%、发酵温度 37.38 °C,发酵时间 3.28 d, α -葡萄糖苷酶抑制率预测值为 40.03%。为满足实际操作条件,选取最适发酵工艺为乳酸菌添加量为 0.9%,发酵温度 37 °C,发酵时间 3 d,此时茶花粉发酵液

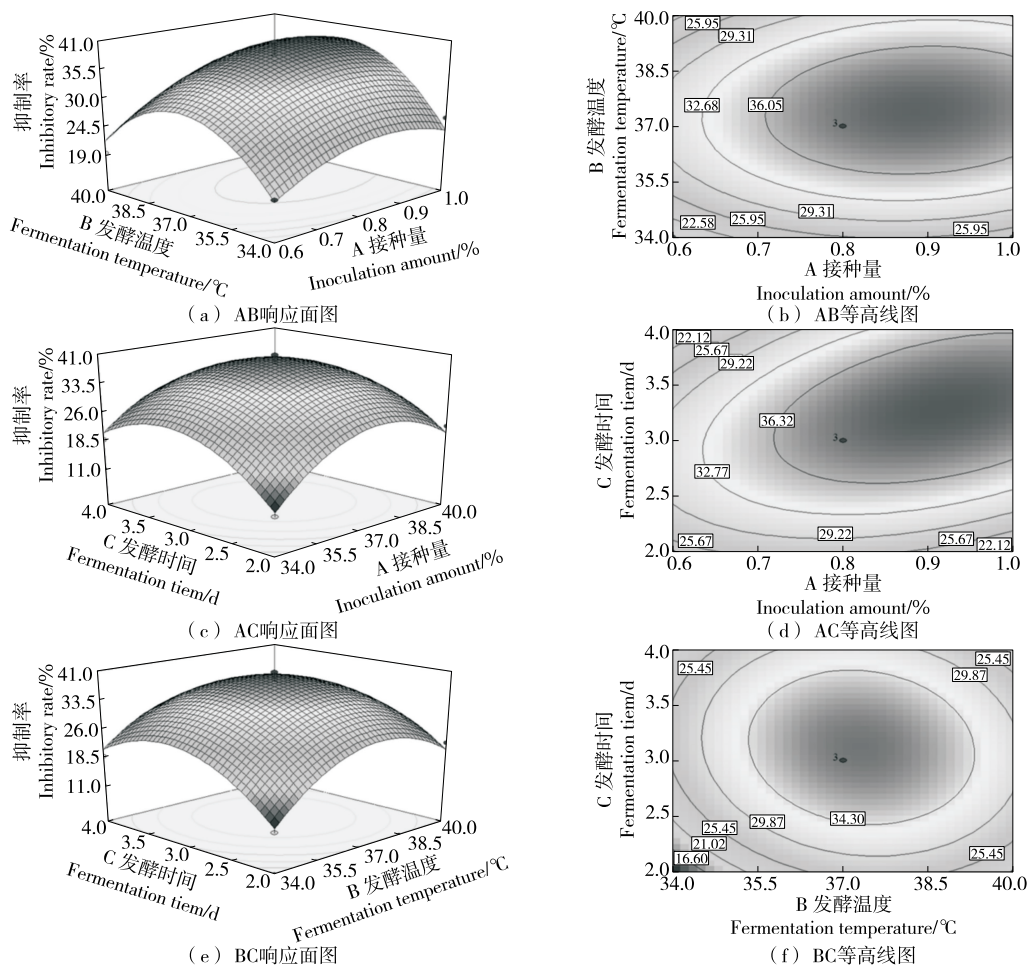


图 4 各因素交互作用对抑制率的影响

Figure 4 The affect of each factor interaction on the inhibition rate

对 α -葡萄糖苷酶的抑制率为38.97% ($n=3$),是未发酵茶花粉的3.11倍,与预测值误差较小,说明以Box-Behnken试验方案优化所得的发酵工艺参数具有较高的可靠性。Sha等^[23]研究发现,与对照组相比,发酵蜂花粉组酚类化合物含量增加了9.3%。Zhang等^[24-25]研究表明发酵提高了蜂花粉中酚类物质种类和含量,其中,具有抑制 α -葡萄糖苷酶活性的根皮素含量增加了3倍。因此,优化条件下茶花粉发酵液的 α -葡萄糖苷酶抑制率远大于未发酵茶花粉,可能是茶花粉发酵液中对 α -葡萄糖苷酶具有抑制作用的物质大量积累所致,但对于影响 α -葡萄糖苷酶抑制率的物质需进一步研究和鉴定。

3 结论

试验表明,乳酸菌接种量对 α -葡萄糖苷酶抑制率影响最大,其次是发酵温度。发酵茶花粉的最优工艺条件为乳酸菌接种量0.9%,发酵温度37℃,发酵时间3d,该条件下茶花粉发酵液对 α -葡萄糖苷酶的抑制率为38.97%,是未发酵茶花粉的3.11倍。后续可对乳酸菌发酵茶花粉引起 α -葡萄糖苷酶抑制活性增强的具体物质进行探索。

参考文献

- [1] ZENG L, ZHANG G, LIAO Y, et al. Inhibitory mechanism of morin on α -glucosidase and its anti-glycation properties[J]. Food & Function, 2016, 7(9): 3 953-3 963.
- [2] THAKUR M, NANDA V. Composition and functionality of bee pollen: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 98: 82-106.
- [3] 赖小燕, 姜泽东, 倪辉, 等. 茶花粉黄酮对 α -葡萄糖苷酶抑制作用的研究[J]. 食品工业科技, 2016, 37(5): 353-357.
LAI X Y, JIANG Z D, NI H, et al. Study on α -glucosidase inhibitory activity of the flavonoids extract from *Camellia* bee pollen[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(5): 353-357.
- [4] DAUDU O M. Bee pollen extracts as potential antioxidants and inhibitors of α -amylase and α -glucosidase enzymes: In vitro assessment[J]. Journal of Apicultural Science, 2019, 63(2): 315-325.
- [5] 高丽娇, 刘佳霖, 罗文华, 等. 不同蜂花粉对意大利蜜蜂蜂群繁殖和工蜂发育的影响[J]. 动物营养学报, 2019, 31(10): 4 630-4 636.
GAI L J, LIU J L, LUO W H, et al. Effects of different bee pollens on colony reproduction and worker development of *Apis mellifera ligustica*[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2019, 31(10): 4 630-4 636.
- [6] 孙旭, 姜泽东, 杜希萍, 等. 乳酸菌发酵对茶花粉营养成分及生物活性的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(3): 44-47, 51.
SUN X, JIANG Z D, DU X P, et al. Effects of lactic fermentation on the nutrient and biological activity of *Camellia* pollen[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(3): 44-47, 51.
- [7] ZHANG Z, CAO H G, CHEN C, et al. Effects of fermentation by *Ganoderma lucidum* and *Saccharomyces cerevisiae* on rape pollen morphology and its wall[J]. Journal of Food Science & Technology, 2017, 54(12): 4 026-4 034.
- [8] VÉGH R, CSÓKA M, SÖRÖS C, et al. Food safety hazards of bee pollen: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 114: 490-509.
- [9] 刘文静, 张志旭, 秦丹. 破壁方式对蜂花粉抑制 α -葡萄糖苷酶活性的影响[J]. 食品与机械, 2017, 33(8): 159-162.
LIU W J, ZHANG Z X, QIN D. Effects of wall breaking manners on the inhibition of α -glucosidase activity in bee pollen[J]. Food & Machinery, 2017, 33(8): 159-162.
- [10] 王晴, 曹稳根, 翟科峰, 等. 油菜蜂花粉总黄酮纤维素酶—超声提取工艺及抗氧化活性[J]. 基因组学与应用生物学, 2021, 40(2): 726-734.
WANG Q, CAO W G, ZHAI K F, et al. Extraction process of cellulase-ultrasound and antioxidant activity for total flavonoids from rape bee pollen[J]. Genomics and Applied Biology, 2021, 40(2): 726-734.
- [11] 任向楠, 张红城, 董捷. 蜂花粉破壁的研究进展[J]. 食品科学, 2009, 30(21): 380-383.
REN X N, ZHANG H C, DONG J. Research progress in cell disruption techniques for pollen [J]. Food Science, 2009, 30(21): 380-383.
- [12] PI X, YANG Y, SUN Y, et al. Recent advances in alleviating food allergenicity through fermentation[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2021(1): 1-14.
- [13] 侯团伟, 段剑平, 吴晓红. 发酵剂在乳品中应用的影响因素及协同发酵的研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(1): 378-386.
HOU T W, DUAN J P, WU X H. Recent progress of influence factors and synergistic fermentation of starters in dairy products[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(1): 378-386.
- [14] 杜兰威, 单蕊, 赵蕾, 等. 乳酸菌的功能及其在食品工业中的应用[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(13): 221-224.
DU L W, SHAN R, ZHAO L, et al. The function of lactobacillus and its application in food industry[J]. Food Research and Development, 2019, 40(13): 221-224.
- [15] VILMA K, AGNE K, PAULIUS K, et al. The impact of solid-state fermentation on bee pollen phenolic compounds and radical scavenging capacity[J]. Chemical Papers, 2018, 72(8): 2 115-2 120.
- [16] SUN J H, SEUNG Y L, YOUNG C K, et al. Effect of fermentation on the antioxidant activity in plant-based foods[J]. Food Chemistry, 2014, 160: 346-356.
- [17] 王聪, 黄艳, 马诗淳, 等. 乳酸菌 *Lactobacillus* sp. strain 2-3 厌氧发酵蜂花粉的工艺优化[J]. 食品工业科技, 2016, 37(23): 119-123, 129.
WANG C, HUANG Y, MA S C, et al. Optimization of the fermentation conditions of bee pollen with *Lactobacillus* sp. strain 2-3[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(23): 119-123, 129.

(下转第39页)

- 相对分子质量[J]. 中草药, 2006, 37(2): 214-215.
- YI J P, YE X, ZHONG R G. Determination of relative molecular mass of *Lycium chinense* Miller polysaccharide by high performance gel permeation chromatography[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2006, 37(2): 214-215.
- [10] 张晓圆, 郭成成, 玉应香, 等. 高脂饲料诱导肥胖胰岛素抵抗大鼠模型的建立[J]. 北京大学学报(医学版), 2020, 52(3): 557-563.
- ZHANG X Y, GUO C C, YU Y X, et al. Establishment of high-fat diet-induced obesity and insulin resistance model in rats[J]. Journal of Peking University (Health Sciences), 2020, 52(3): 557-563.
- [11] 赵凯迪, 王秋丹, 林长青. 菊花多糖对 2 型糖尿病大鼠的降血糖作用[J]. 食品与机械, 2022, 38(1): 168-174.
- ZHAO K Y, WANG Q D, LIN X Q. Study on the effect of chrysanthemum polysaccharide on hypoglycemic in type 2 diabetic rats[J]. Food & Machinery, 2022, 38(1): 168-174.
- [12] 魏伟. 黄芪多糖对肥胖模型大鼠胰岛素抵抗的作用研究[J]. 河南中医, 2021, 41(4): 562-565.
- WEI Y. Study of efficacy of *Astragalus* polysaccharides on insulin resistance in obesity model rats [J]. Henan Traditional Chinese Medicine, 2021, 41(4): 562-565.
- [13] 盛泽萱, 李冰涛, 张启云, 等. 高脂饲料诱导胰岛素抵抗大鼠的代谢机制研究[J]. 中药药理与临床, 2019, 35(3): 185-191.
- SHENG Y X, LI B T, ZHANG Q Y, et al. Metabolic mechanism of rats with insulin resistance induced by high-fat diet[J]. Pharmacology and Clinics of Chinese Materia Medica, 2019, 35(3): 185-191.
- [14] 陈超, 谭书明, 王画, 等. 刺梨及其活性成分对 2 型糖尿病小鼠糖脂代谢的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(13): 146-154.
- CHEN C, TAN S M, WANG H, et al. Effects of *Rosa roxburghii* Tratt and its active ingredients on glucose and lipid metabolism in type2 diabetic mice[J]. Food Science, 2022, 43(13): 146-154.
- [15] JIA W P, MA J H, MIAO H, et al. Chiglitazart monotherapy with sitagliptin as an active comparator in patients with type 2 diabetes: A randomized, double-blind, phase 3 trial [J]. Science Bulletin, 2021, 66(15): 1 571-1 580.
- [16] 邹大进, 李慧. 肥胖、炎症与胰岛素抵抗[J]. 国外医学(内分泌学分册), 2004, 24(4): 291-293.
- ZOU D J, LI H. Obesity, inflammation and insulin resistance[J]. Section of Endocrinology Foreign Medical Sciences, 2004, 24(4): 291-293.
- [17] 彭钦. 天然多糖体外抗氧化活性研究[D]. 天津: 天津大学, 2014: 4-9.
- PENG Q. Antioxidant activity of natural polysaccharides in vitro[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014: 4-9.
- [18] 汪洋, 汪少华, 吕寒. 刺梨乙醇提取物体外抗氧化活性和 α -葡萄糖苷酶抑制活性的研究[J]. 中国现代应用药学, 2016, 33(8): 1 003-1 006.
- WANG Y, WANG S H, LU H. Study on the in vitro antioxidant and α -glucosidase inhibitory activities of ethanol extract of fruit of *Rosa roxburghii* [J]. Chinese Journal of Modern Applied Pharmacy, 2016, 33(8): 1 003-1 006.
- [19] HAO J H, TANG Y, LIU X H, et al. Inhibiting PI3K leads to glucose metabolism disturbance in default mode network [J]. Brain Research Bulletin, 2021, 170(5): 218-224.
- [20] ROSCA M G, VAZQUEZ E J, CHEN Q, et al. Oxidation of fatty acids is the source of increased mitochondrial reactive oxygen species production in kidney cortical tubules in early diabetes[J]. Diabetes, 2012, 61(8): 2 074-2 083.
- (上接第 33 页)
- [18] 杨文超, 刘赛, 吴珍红, 等. 蜂粮源乳酸菌发酵油菜花粉的工艺优化[J]. 中国蜂业, 2012, 63(Z4): 68-73.
- YANG W C, LIU S, WU Z H, et al. Fermentation technics of rape bee pollen with lactic acid bacteria (LAB) from bee bread[J]. Apiculture of China, 2012, 63(Z4): 68-73.
- [19] QI J, KIM S M. α -Glucosidase inhibitory activities of lutein and zeaxanthin purified from green alga *Chlorella ellipsoidea* [J]. Journal of Ocean University of China, 2018, 17(4): 983-989.
- [20] 韩玮, 吴正钧, 刘振民, 等. 牛类芽孢杆菌 BD3526 产 α -葡萄糖苷酶抑制剂的条件优化[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(19): 45-51.
- HAN J, WU Z J, LIU Z M, et al. Optimized condition for biosynthesizing α -glucosidase inhibitor in *Paenibacillus bovis* BD3526[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(19): 45-51.
- [21] 晏幸, 戴宇琪, 欧丽明, 等. 琯溪蜜柚柚皮黄酮提取工艺优化[J]. 食品工业科技, 2020, 41(17): 135-140.
- YAN X, DAI Y Q, OU L M, et al. Optimization of flavonoids extraction from guanxi honey pomelo peel [J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(17): 135-140.
- [22] 许海棠, 廖华珍, 赵彦芝, 等. 响应面法优化山豆根多糖提取工艺及其分级醇沉组分的抗氧化活性[J]. 食品工业科技, 2019, 40(22): 157-162.
- XU H T, LIAO H Z, ZHAO Y Z, et al. Optimization extraction of polysaccharide from *sophora tonkinensis* Gagnep by response surface methodology and its antioxidant activity of fractionated alcohol precipitation components[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(22): 157-162.
- [23] SHA Y, LI Q, XUE X F, et al. Analysis of improved nutritional composition of bee pollen (*Brassica campestris* L.) after different fermentation treatments[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2019, 54(6): 2 169-2 181.
- [24] ZHANG H F, LU Q, LIU R. Widely targeted metabolomics analysis reveals the effect of fermentation on the chemical composition of bee pollen[J]. Food Chemistry, 2022, 375: 131908.
- [25] ZHU R, PENG Q, HAN L, et al. Inhibitory effect of phloretin on α -glucosidase: Kinetics, interaction mechanism and molecular docking[J]. International Journal of Biological Macromolecules Structure Function & Interactions, 2017, 95: 520-527.