

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2019.01.028

不同方法提取荷花蜂花粉可溶性膳食纤维的多酚含量及对微生物生长的影响

Determination of the polyphenols contents in Lotus bee pollen soluble dietary fiber by different methods and study on its effects on growth of microorganism

郑 慧^{1,2} 杨 勇¹ 曾艺琼¹

ZHENG Hui^{1,2} YANG Yong¹ ZENG Yi-qiong¹

梁倩倩¹ 单 硕¹ 李顺祥²

LIANG Qian-qian¹ SHAN Suo¹ LI Shun-xiang²

(1. 湖南中医药大学药学院食品药品工程系, 湖南 长沙 410208;

2. 湖南省中药活性物质筛选工程技术研究中心, 湖南 长沙 410208)

(1. Department of Food and Drug Engineering, College of Pharmacy, Hunan University of Traditional Chinese Medicine, Changsha, Hunan 410208, China; 2. Hunan Province Engineering Research Center of Bioactive Substance Discovery of Traditional Chinese Medicine, Changsha, Hunan 410208, China)

摘要:以纤维素酶酶解提取、酸溶液提取、碱溶液提取 3 种方法提取的荷花蜂花粉可溶性膳食纤维 (bee pollen soluble dietary fiber, BPSDF) 为研究对象, 探究提取方法对 BPSDF 多酚含量及常见致病菌、有益菌生长的影响。结果表明, BPSDF 中多酚主要以游离态的形式存在, 纤维素酶酶解提取、酸溶液提取、碱溶液提取的游离酚分别占其总酚的 81.16%, 80.34%, 69.59%; 纤维素酶酶解提取的游离酚、总酚含量相对较高; 碱溶液提取的结合酚含量相对较高。提取方法不同 BPSDF 游离酚、结合酚和总酚含量均差异显著, 但对 BPSDF 中游离酚、结合酚的多酚组分影响较小。3 种方法提取的 BPSDF 对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、白色念珠球菌均有较好的抑制作用, 相对来说纤维素酶酶解提取的 BPSDF 的抑菌作用最好; 3 种方法提取的 BPSDF 对双歧杆菌和嗜酸乳杆菌有一定的促进作用, 且对供试有害菌的抑制作用优于对供试有益菌的促进作用。

关键词:荷花蜂花粉; 可溶性膳食纤维; 提取方法; 多酚; 有害菌; 有益菌

Abstract: Bee Pollen Soluble Dietary Fiber (BPSDF) was extracted from Lotus bee pollen by cellulase enzymatic extraction, acid solution extraction and alkali solution extraction. The effects of three extraction methods on the polyphenols contents and the growth of harmful bacteria and beneficial bacteria were studied. The results showed that the polyphenols in BPSDF were mainly in free form. The contents of free polyphenols in BPSDF were 81.16%, 80.34% and 69.59% respectively by cellulase enzymatic extraction, acid solution extraction and alkali solution extraction. The contents of free phenol and total polyphenols in BPSDF were relatively higher by cellulase enzymatic extraction, and the content of the binding polyphenols in BPSDF was relatively higher by alkaline solution extraction. The contents of free polyphenols, binding polyphenols and total polyphenols in BPSDF were significantly different with different extraction methods, but the effects on the constituents of free polyphenols and binding polyphenols in BPSDF were less. BPSDF by three extraction methods has good inhibitory effects on *E. coli*, *Staphylococcus aureus* and *Candida sporogenes* respectively, and BPSDF by cellulase enzymatic extraction has the better inhibitory effect. BPSDF by three extraction methods has certain promoting effects on *Bifidobacterium* and *Lactobacillus acidophilus*. The inhibition effects of BPSDF on the tested harmful bacteria were better than

基金项目:湖南省教育厅科学研究项目(编号:17C1208); 湖南中医药大学双一流食品科学与工程学科建设经费(编号:4901|020000200902)

作者简介:郑慧, 女, 湖南中医药大学讲师, 硕士。

通信作者:李顺祥(1964—), 男, 湖南省中药活性物质筛选工程技术研究中心二级教授, 博士生导师, 博士。

E-mail: lishunxiang@hotmail.com

收稿日期:2018-07-09

that of the tested beneficial bacteria.

Keywords: Lotus bee pollen; soluble dietary fiber; extracting methods; polyphenols; harmful bacteria; beneficial bacteria

蜂花粉被誉为“微型营养库”,在中国其药食兼用历史可追溯到两千年前。依托中国丰富的蜂花粉资源,近年来中国蜂花粉相关研究日益升温,主要集中在细胞壁破壁,总黄酮、总多酚、多糖等成分的研究上,其中多酚类组分因其较强的抗氧化性,已成为蜂花粉的特征性功效成分^[1-3]。前期研究^[4]表明蜂花粉纤维类组分含量丰富,可溶性膳食纤维(soluble dietary fiber, SDF)含量为4%~9%。且纤维组分的提取工艺势必会影响蜂花粉的蛋白致敏源,可能降低蜂花粉致敏性,同时解决含杂含砂、口感独特等制约其进一步开发利用的难题。

近年来膳食纤维因其良好的生理功能^[5-6],已成为产品开发的研究热点,其中 SDF 因其良好的溶解性,被广泛地应用于乳制品、饮料等食品中^[7-8];同时研究^[9-10]多认为膳食纤维的抗氧化性、降血糖、减肥、减少慢性胃肠道紊乱等功效与其中含有的多酚类紧密有关。研究^[11]表明蜂花粉中含有丰富的多酚类化合物,则其纤维组分也可能含有一定量的多酚类物质。目前,蜂花粉纤维类组分的研究刚刚起步,提取方法对蜂花粉可溶性膳食纤维(bee pollen soluble dietary fiber, BPSDF)中多酚含量影响的相关研究暂未有报导。本试验拟在前期研究基础上,分别采用纤维素酶酶解提取、酸溶液提取、碱溶液提取3种方法制备 BPSDF,探究提取方法对 BPSDF 游离酚、结合酚及总酚含量,以及对常见致病菌、有益菌生长的影响,为后期蜂花粉纤维组分的深入研究及产品的开发利用提供参考。

1 材料与方 法

1.1 材料与主要仪器

1.1.1 材料与试剂

荷花蜂花粉:2017 年产自湖南,长沙蜂舞人间生物科技有限公司;

原儿茶酸:分析标准品,上海跃腾生物技术有限公司;

纤维素酶:国药集团化学试剂有限公司;

丙酮、福林酚、乙酸乙酯、盐酸、氢氧化钠、碳酸钠、乙醇等:分析纯;

LB 培养基(用于培养大肠杆菌和金黄色葡萄球菌)、SDA 培养基(用于培养白色念珠球菌)、MRS 培养基(用于培养双歧杆菌和嗜酸乳杆菌);杭州百思生物技术有限公司;

大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、白色念珠球菌:上海鲁微科技有限公司;

嗜酸乳杆菌冻干粉:广东省菌种保藏中心;

双歧杆菌:由湖南中医药大学药学院食品科学与工程教研室保存。

1.1.2 主要仪器设备

生化培养箱:MJX-150BX 型,天津泰斯特仪器有限公司;

立式压力蒸汽灭菌器:LDZM-60KCS 型,上海申安医疗器械厂;

净化工作台:SW-CJ-2FD 型,北京中兴伟业仪器有限公司;

恒温振荡器:ZHWHY-200D 型,上海智诚分析仪器制造有限公司;

电子分析天平:AV1120 型,日本岛津仪器有限公司;

电子恒温水浴锅:DZKW-4 型,北京中关伟业仪器有限公司;

pH 计:STARTER3100/F 型,奥豪斯仪器有限公司;

紫外可见分光光度计:UV 2450 型,日本岛津仪器有限公司;

高效液相色谱仪配紫外检测器:Agilent 1260 型,美国安捷伦公司。

1.2 试验方法

1.2.1 BPSDF 提取

(1) 纤维素酶酶解提取:准确称取 100 g 蜂花粉置于 pH 4.0 水溶液中,加入 2.5 g 纤维素酶,50 °C 振摇 2 h,85 °C 水浴 10 min 灭酶。3 500 r/min 离心 10 min 后取上清液,用 4 倍体积的 95% 乙醇醇沉,5 °C 静置过夜,3 500 r/min 离心 10 min 取沉淀,置于真空干燥箱 60 °C 干燥 10 h 得到酶提 BPSDF^[12]。

(2) 酸溶液提取:准确称取 100 g 蜂花粉置于 pH 4.3 水溶液中,50 °C 振摇 2 h。3 500 r/min 离心 10 min 取上清液,其后按酶解提取中后续方法进行,得到酸提 BPSDF^[13]。

(3) 碱溶液提取:准确称取 100 g 蜂花粉置于 pH 10.0 水溶液中,50 °C 振摇 2 h。3 500 r/min 离心 10 min 取上清液,其后按酶解提取方法进行,得到碱提 BPSDF^[14]。

1.2.2 游离态多酚的提取 参照 Adom 等^[15]的方法,稍作修改。准确称取 4.000 g BPSDF 于离心管中,加入 80% 冷冻丙酮溶液 16 mL,5 °C 振摇 1 h,于 3 500 r/min 离心 10 min,取上清液。残渣重复提取 2 次,合并上清液,抽滤后 45 °C 旋转蒸干,用甲醇定容,-5 °C 保存备用。

1.2.3 结合态多酚的提取 BPSDF 游离酚提取后的残渣加入 2 mol/L NaOH 溶液 4 mL,充分搅拌后避光消化 1 h,用浓盐酸调至 pH 2。加入 8 mL 乙酸乙酯并充分搅拌提取 10 min,3 500 r/min 离心 10 min,取上清液。重复提取 5 次,合并上清液。抽滤后 45 °C 旋转蒸干,用甲醇定容,-5 °C 保存备用。

1.2.4 多酚含量的测定 准确称取原儿茶酸标准品,定容后得原儿茶酸标准溶液。准确量取原儿茶酸标准溶液 0.0,0.1,0.2,0.3,0.4,0.5 mL 于 10 mL 容量瓶中,各加 6 mL 水,摇匀,再加 0.5 mL 福林酚试剂,充分摇匀。1 min 之后,加入 20% Na_2CO_3 溶液 1.5 mL,混匀后定容。在室温下反应 10 min,于 765 nm 波长下测定吸光值,以原儿茶酸浓度为横坐标,吸光值为纵坐标,得原儿茶酸标准曲线回归方程: $y = 102.54x + 0.0051$ ($R^2 = 0.9992$)。BPSDF 多酚含量测定的操作同标准曲线制备。

1.2.5 多酚的 HPLC 分析 BPSDF 多酚提取液经 0.45 μm 微孔滤膜过滤后待用。色谱条件^[16]: Ultimate XB-C₁₈ 色谱柱(250 mm×4.6 mm,5 μm);流动相:纯水—甲醇(体积比 50:50);柱温:25 $^{\circ}\text{C}$;检测波长:280 nm;流速为 1.0 mL/min;进样量:20 μL 。

1.2.6 BPSDF 对有益菌、有害菌生长的影响

(1) 菌悬液的制备:供试菌种活化后,挑取斜面培养基上的菌苔,用无菌水采用梯度法稀释,依次得到不同浓度的供试菌悬液。

(2) 试验培养基的配制:分别称取 BPSDF 于适量蒸馏水中,50 $^{\circ}\text{C}$ 振荡 5 h,充分溶解后备用。各基础培养基配置、密封后,于高压灭菌锅 121 $^{\circ}\text{C}$ 灭菌 30 min,取出后将各 BPSDF 水溶液按比例添加到基础培养基中,得到含有 BPSDF 分别为 1,3,5 g/L 3 个浓度的试验培养基,同时以不添加 BPSDF 的基础培养基作对照。

(3) 菌体生长试验、计数统计:在无菌操作台上进行无菌操作,准确移入 1 mL 受试菌悬液于无菌培养皿中,再趁热分别移入 10 mL 含有 BPSDF 1,3,5 g/L 3 个浓度的试验培养基以及对照培养基,振荡摇匀,待培养基凝固后移入培养箱中,在受试菌规定的温度、时间下进行培养,观察不同提取方法、不同浓度 BPSDF 对各受试菌生长的影响。采用平板菌落计数法,对受试菌的培养结果按式(1)进行活菌落计数,将结果换算成 $\lg N$ 进行统计分析^[17]。

$$N = n \times m \times 10, \quad (1)$$

式中:

N ——活菌数,CFU;

n ——细菌菌落数,CFU;

m ——稀释倍数。

1.2.7 统计分析 每个试样重复 3 次。试验数据采用 SPSS 22.0 软件进行统计分析,结果采用平均数±标准差表示。

2 结果与分析

2.1 不同方法提取 BPSDF 的游离酚、结合酚和总酚含量

由表 1 可得,在提取过程中蜂花粉原料中的多酚类物质除溶于水、乙醇溶液而流失外,还有部分被残留在

BPSDF 中。多酚在食品基质中可能以单体的形式被物理吸附或截留成为游离态多酚,或与基质通过化学键的结合而成为结合态多酚^[18]。游离态多酚多通过胃、小肠消化吸收而发挥功效;结合态多酚则能到达大肠,在肠道微生物的作用下实现游离化而发挥其功效^[19-20]。

从表 1 还可知,不同方法提取 BPSDF 的游离酚、结合酚和总酚含量均差异显著,游离酚为 0.309~0.435 mg/g,结合酚含量为 0.092~0.135 mg/g,总酚含量为 0.444~0.536 mg/g。纤维素酶酶解提取、酸溶液提取、碱溶液提取 BPSDF 游离酚分别占其总酚的 81.16%,80.34%,69.59%,可推知 BPSDF 中多酚主要以游离酚的形式存在。同时,酶提 BPSDF 游离酚、总酚含量较高,分别为碱提的 1.41,1.21 倍;碱提 BPSDF 结合酚含量较高,为酸提的 1.47 倍。不同的提取方法可能导致蜂花粉细胞壁裂解组分、同一组分裂解方式不同,得到的 BPSDF 组成成分、分子量大小、碳链长短不同^[12],从而影响 BPSDF 中残留多酚的含量及多酚存在形式。

表 1 BPSDF 游离酚、结合酚和总酚含量[†]

Table 1 Contents of free polyphenols, binding polyphenols and total polyphenols in BPSDF mg/g

样品	游离酚	结合酚	总酚
原料	2.428±0.014 ^d	0.452±0.001 ^d	2.880±0.013 ^d
酶提 BPSDF	0.435±0.013 ^c	0.101±0.002 ^b	0.536±0.009 ^c
酸提 BPSDF	0.376±0.006 ^b	0.092±0.004 ^a	0.468±0.004 ^b
碱提 BPSDF	0.309±0.001 ^a	0.135±0.003 ^c	0.444±0.003 ^a

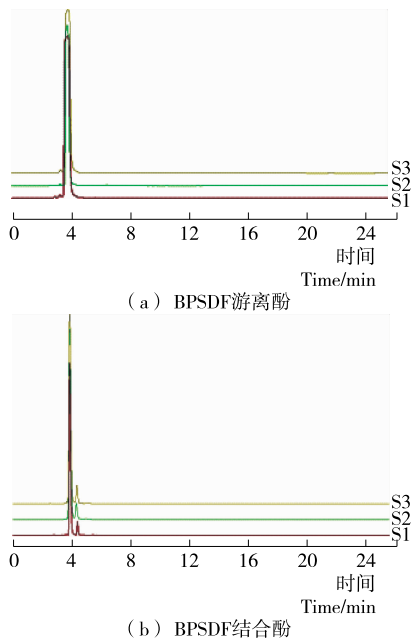
† 同列不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。

2.2 不同方法提取 BPSDF 游离酚、结合酚的 HPLC 图谱

3 种方法提取 BPSDF 的游离酚、结合酚 HPLC 叠加图谱如图 1 所示,游离酚、结合酚 HPLC 图谱峰形相似,出峰时间相近,出峰面积略有差异。其中,BPSDF 游离酚在 3.775 min 附近均出现较大吸收峰,结合酚在 3.775,4.256 min 附近均出现较大吸收峰。从 HPLC 图谱初步推之,提取条件虽对蜂花粉多酚含量有一定影响,但对保留在 BPSDF 中各游离酚、结合酚中主要的多酚组分影响较小,其具体差异性还需进一步研究确定。

2.3 不同方法提取 BPSDF 对大肠杆菌生长的影响

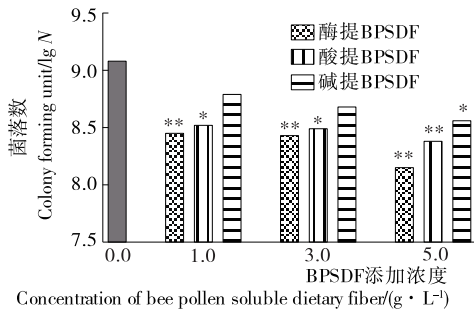
如图 2 所示,与空白对照组相比,不同方法提取的 BPSDF 对大肠杆菌均有一定的抑制作用;且随着试验培养基中 BPSDF 浓度增加,抑制能力增加。同时,同种浓度下添加酶提 BPSDF 供试培养基的大肠杆菌菌落数最低,与空白对照组相比在 1 g/L 浓度下即有极显著差异,抑制作用最强;其次,酸提 BPSDF 1 g/L 浓度下与空白对照组相比差异显著,5 g/L 浓度达到差异极显著;碱提 BPSDF 对大肠杆菌的抑制作用相对较低,在 5 g/L 浓度



S1. 酶提 BPSDF S2. 酸提 BPSDF S3. 碱提 BPSDF

图 1 BPSDF 游离酚、结合酚 HPLC 图谱

Figure 1 HPLC chromatograms of free polyphenols, binding polyphenols in BPSDF



* 表示与空白对照组差异显著 ($P < 0.05$), ** 表示与空白对照组差异极显著 ($P < 0.01$)

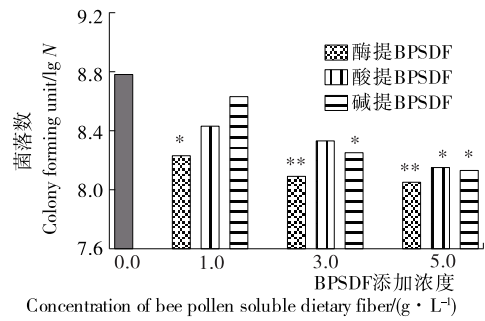
图 2 BPSDF 对大肠杆菌菌落数的影响

Figure 2 The influence of BPSDF on *E. coli* colonies

下与空白对照组相比差异显著。3 种方法提取的 BPSDF 对大肠杆菌的抑制能力与其含有游离酚、总酚含量高低的趋势一致。

2.4 不同方法提取 BPSDF 对金黄色葡萄球菌生长的影响

如图 3 所示,与空白对照组相比,3 种方法提取的 BPSDF 对金黄色葡萄球菌均有一定的抑制作用;且随着试验培养基中 BPSDF 浓度增加,抑制能力增加。同时,同种浓度下添加酶提 BPSDF 供试培养基的金黄色葡萄球菌菌落数最低,与空白对照组相比在 1 g/L 浓度下差异显著,在 3 g/L 浓度下达到差异极显著,抑制作用最强。其次,碱提 BPSDF 在 3 g/L 浓度下与空白对照组相比差



* 表示与空白对照组差异显著 ($P < 0.05$), ** 表示与空白对照组差异极显著 ($P < 0.01$)

图 3 BPSDF 对金黄色葡萄球菌菌落数的影响

Figure 3 The influence of BPSDF on *Staphylococcus aureus* colonies

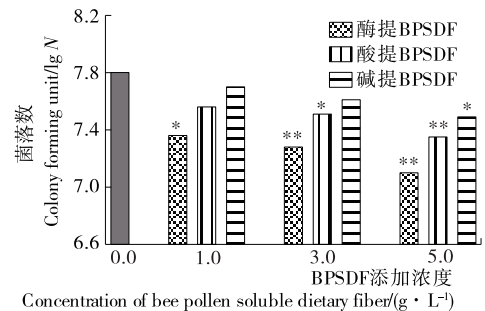
异显著,酸提 BPSDF 在 5 g/L 浓度下与空白对照组相比差异显著。

2.5 不同方法提取 BPSDF 对白色念珠球菌生长的影响

如图 4 所示,与空白对照组相比,3 种方法提取的 BPSDF 对白色念珠球菌均有一定的抑制作用;随着试验培养基中 BPSDF 浓度增加,抑制能力增加。同时,同种浓度下添加酶提 BPSDF 供试培养基的白色念珠球菌菌落数最低,与空白对照组相比在 1 g/L 浓度下差异显著,3 g/L 时差异极显著,抑制作用最强。其次,酸提 BPSDF 在 3 g/L 浓度下与空白对照组相比差异显著,5 g/L 浓度达到差异极显著。碱提 BPSDF 对白色念珠球菌的抑制作用相对较低,在 5 g/L 浓度下与空白对照组相比差异显著。3 种方法提取的 BPSDF 对白色念珠球菌的抑制能力与其含有游离酚、总酚含量高低的趋势一致。

2.6 不同方法提取 BPSDF 对双歧杆菌生长的影响

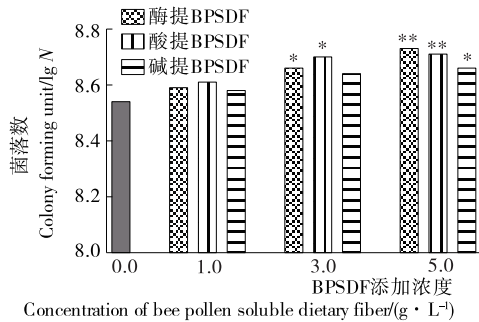
如图 5 所示,与空白对照组相比,3 种方法提取的 BPSDF 对双歧杆菌均有一定的促进作用;且随着试验培养基中 BPSDF 浓度增加,促进能力增加。同时,同种浓度下添加酶提、酸提 BPSDF 供试培养基的双歧杆菌菌落



* 表示与空白对照组差异显著 ($P < 0.05$), ** 表示与空白对照组差异极显著 ($P < 0.01$)

图 4 BPSDF 对白色念珠球菌菌落数的影响

Figure 4 The influence of BPSDF on *Candida sporogenes* colonies



* 表示与空白对照组差异显著 ($P < 0.05$), ** 表示与空白对照组差异极显著 ($P < 0.01$)

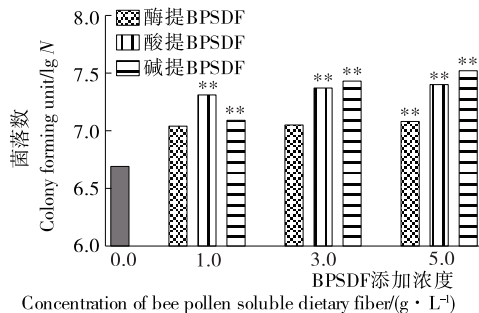
图5 BPSDF对双歧杆菌菌落数的影响

Figure 5 The influence of BPSDF on Bifidobacterium colonies

数较高,与空白对照组相比均在 3 g/L 浓度下差异显著,5 g/L 时差异极显著,促进作用较强。碱提 BPSDF 对双歧杆菌的促进作用相对较低,在 5 g/L 浓度下与空白对照组相比差异显著。

2.7 不同方法提取 BPSDF 对嗜酸乳杆菌生长的影响

如图 6 所示,与空白对照组相比,3 种方法提取的 BPSDF 对嗜酸乳杆菌均有一定的促进作用;且随着试验培养基中 BPSDF 浓度增加,促进能力增加。同时,同种浓度下添加碱提、酸提 BPSDF 供试培养基的嗜酸乳杆菌菌落数较高,与空白对照组相比均在 1 g/L 浓度下达到差异极显著,促进作用相对较强。相同浓度下酶提 BPSDF 供试培养基的嗜酸乳杆菌菌落数较低,在 5 g/L 浓度下与空白对照组相比差异极显著,对嗜酸乳杆菌的促进作用相对较低。



* 表示与空白对照组差异显著 ($P < 0.05$), ** 表示与空白对照组差异极显著 ($P < 0.01$)

图6 BPSDF对嗜酸乳杆菌菌落数的影响

Figure 6 The influence of BPSDF on Lactobacillus acidophilus colonies

3 结论

本研究探讨了 3 种方法提取的 BPSDF 中多酚存在形式及其含量,BPSDF 对常见有害菌、有益菌的影响。结

果表明,BPSDF 中多酚主要以游离酚的形式存在;提取方法对其保留的游离酚、结合酚的多酚组分影响较小。3 种方法提取的 BPSDF 对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、白色念珠球菌有较好的抑制作用,对双歧杆菌和嗜酸乳杆菌有一定的促进作用。从抑制有害菌、促进有益菌生长的百分率对比分析,BPSDF 对供试有害菌的抑制作用优于对供试有益菌的促进作用。并且,BPSDF 中总酚、游离酚含量与其对供试有害菌抑制作用的趋势相符,采用纤维素酶酶解提取 BPSDF 其总酚、游离酚残留较高,对 3 种供试有害菌的抑制作用较好。

另外,糖份作为微生物生长所需的养分。BPSDF 对微生物生长的影响不仅与其所含多酚相关,也应与其所含糖相关。故后续将对不同方法提取的 BPSDF 中糖的组成做进一步研究。

参考文献

- [1] 王凯,任向楠,董捷,等.多指标评价果胶酶对油菜蜂花粉的破壁作用[J].食品与机械,2015,31(6):164-168.
- [2] GAMPOS M G, WEBBY R F, MARKHAM K R, et al. Age-induced diminution of free radical scavenging capacity in bee pollens and the contribution of constituent flavonoids[J]. J. Agric. Food Chem., 2003, 51: 742-745.
- [3] 陈莲君,徐德平.油菜蜂花粉中黄酮的分离纯化及结构鉴定[J].食品与机械,2012,28(3):119-121.
- [4] 郑慧,陈希平,尤祯丹,等.四种蜂花粉纤维组分分析与评价[J].营养学报,2017,39(5):513-514.
- [5] GONG Joshua, YANG Cheng-bo. Advances in the methods for studying gut microbiota and their relevance to the research of dietary fiber functions[J]. Food Research International, 2012, 48(2): 913-929.
- [6] GUO W W, BETA T. Phenolic acid composition and antioxidant potential of insoluble and soluble dietary fibre extracts derived from select whole-grain cereals[J]. Food Research International, 2013, 51: 518-525.
- [7] 龚广予,夏宏钢.膳食纤维在乳制品中的应用[J].乳业科学与技术,2002,25(3):5-8.
- [8] ZHANG Juan, WANG Zheng-wu. Soluble dietary fiber from *Canna edulis* Ker by-product and its physicochemical properties[J]. Carbohydrate Polymers, 2013, 92: 289-296.
- [9] 谌小立,赵国华.抗氧化膳食纤维研究进展[J].食品科学,2009,30(5):287-290.
- [10] 覃思,蒋立文,侯德兴.膳食多酚生理功能的营养基因组学研究现状与展望[J].中国食品学报,2011,11(9):155-169.
- [11] MOHDALY A A A, MAHMOUD A A, ROBY M H H, et al. Phenolic Extract from Propolis and Bee Pollen: Composition, Antioxidant and Antibacterial Activities[J]. Journal of Food Biochemistry, 2015, 39(5): 538-547.

(下转第 236 页)

- al. Detection of melamine in milk powders using near-infrared hyperspectral imaging combined with regression coefficient of partial least squares regression model [J]. *Talanta*, 2016, 151: 183-191.
- [33] DÉBORA A P Forchetti, RONEI J Poppi. Use of NIR hyperspectral imaging and multivariate curve resolution (MCR) for detection and quantification of adulterants in milk powder [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2017, 76: 337-343.
- [34] 刘宸, 王庆艳, 黄文倩, 等. 拉曼高光谱成像系统中光在奶粉层的穿透深度研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(10): 3 103-3 107.
- [35] QIN Jian-wei, CHAO Kuang-lin, MOON S Kim. Simultaneous detection of multiple adulterants in dry milk using macro-scale Raman chemical imaging[J]. *Food Chemistry*, 2013, 138: 998-1 007.
- [36] 张倩倩, 谭琨. 基于高光谱的牛奶中真蛋白质含量反演[J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35(12): 3 436-3 439.
- [37] 赵紫竹, 卫勇, 张乃迁, 等. 基于高光谱的牛奶脂肪质量浓度预测模型建立与评价[J]. *中国乳品工业*, 2018, 46(2): 45-48.
- [38] 赵紫竹, 卫勇, 常若葵, 等. 牛奶中蜡样芽孢杆菌高光谱检测模型构建与分析[J]. *现代食品科技*, 2017, 33(12): 249-254.
- [39] 刘佳丽, 吴海云, 卫勇, 等. 基于高光谱技术结合纹理特征分析牛奶致病菌[J]. *农技服务*, 2017, 34(5): 1-3.
- [40] DARNAY Livia, KRÁLIK Flóra, OROS Gergely, et al. Monitoring the effect of transglutaminase in semi-hard cheese during ripening by hyperspectral imaging[J]. *Journal of Food Engineering*, 2017, 196: 123-129.
- [41] VASQUEZ Nadya, MAGAN Claudia, OBLITAS Jimmy, et al. Comparison between artificial neural network and partial least squares regression models for hardness modeling during the ripening process of Swiss-type cheese using spectral profiles[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 219: 8-15.

(上接第 163 页)

- [12] 郑慧, 陈希平, 尤祯丹, 等. 蜂花粉可溶性膳食纤维酶法提取工艺优化及其理化分析[J]. *食品与机械*, 2016, 32(12): 184-188.
- [13] 郑慧, 陈希平, 常新利, 等. 响应面优化蜂花粉可溶性膳食纤维提取工艺[J]. *湖南中医药大学学报*, 2015, 35(2): 20-24.
- [14] 郑慧, 陈希平, 胡熙, 等. 蜂花粉可溶性膳食纤维碱提工艺[J]. *食品科技*, 2015, 35(9): 222-226.
- [15] ADOM K K, LIU Rui-hai. Antioxidant activity of grains[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2002, 50(21): 6 182-6 187.
- [16] 旷慧, 冯建文, 范倩, 等. 红树莓多酚的组分分析及体外抗脂质过氧化活性[J]. *食品科学*, 2018, 39(3): 83-89.
- [17] 余有贵, 李忠海, 黄国华, 等. 菌质可溶性膳食纤维对肠道菌群体外生长的影响[J]. *中国食品学报*, 2015, 15(2): 34-38.
- [18] 颜才植, 叶发银, 赵国华. 食品中多酚形态的研究进展[J]. *食品科学*, 2015, 36(15): 249-254.
- [19] 左丹, 廖霞, 李瑶, 等. 基于肠道吸收机制的膳食多酚代谢研究进展[J]. *食品科学*, 2017, 38(7): 266-271.
- [20] MOSELE J I, MACIÀ A, ROMERO M P, et al. Application of in vitro, gastrointestinal digestion and colonic fermentation models to pomegranate products (juice, pulp and peel extract) to study the stability and catabolism of phenolic compounds [J]. *Journal of Functional Foods*, 2015, 14: 529-540.

(上接第 220 页)

- [68] HOU Min-zhi, CHENG Zhi-qiang, SHEN Hong-wei, et al. High expression of CTHRC1 promotes EMT of epithelial ovarian cancer (EOC) and is associated with poor prognosis[J]. *Oncotarget*, 2015, 6(34): 35 813-35 829.
- [69] DA Chun-li, LIU Yu-ting, ZHAN Yi-yi, et al. Nobiletin inhibits epithelial-mesenchymal transition of human non-small cell lung cancer cells by antagonizing the TGF- β 1/Smad3 signaling pathway[J]. *Oncology Reports*, 2016, 35(5): 2 767-2 774.
- [70] FENG Sen-ling, YUAN Zhong-wen, YAO Xiao-jun, et al. Tangeretin, a citrus pentamethoxyflavone, antagonizes ABCB1-mediated multidrug resistance by inhibiting its transport function [J]. *Pharmacological Research*, 2016, 110: 193-204.
- [71] LAI C S, HO M H, TSAI M L, et al. Suppression of adipogenesis and obesity in high-fat induced mouse model by hydroxylated polymethoxyflavones[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2013, 61(43): 10 320-10 328.
- [72] CHAROENSINPHON N, QIU P, PING D, et al. 5-Demethyltangeretin inhibits human nonsmall cell lung cancer cell growth by inducing G₂/M cell cycle arrest and apoptosis[J]. *Molecular Nutrition and Food Research*, 2013, 57(12): 2 103-2 111.
- [73] ZHENG Jin-kai, SONG Ming-yue, DONG Ping, et al. Identification of novel bioactive metabolites of 5-demethyl-Nobiletin in mice[J]. *Molecular Nutrition and Food Research*, 2013, 57(11): 1 999-2 007.
- [74] HEIM K E, TAGLIAFERRO A R, BOBILYA D J. Flavonoid antioxidants: chemistry, metabolism and structure-activity relationships[J]. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 2002, 13(10): 572-584.
- (本文系 2018 年湖南省研究生创新论坛一等奖论文)