

谈江莹, 陈紫婷, 秦佳斌, 等. 莲原花青素对华夫饼 AGEs 的抑制及感官品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(11): 284-294. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021080330

TAN Jiangying, CHEN Ziting, QIN Jiabin, et al. Effects of Lotus Seedpod Procyanidins on AGEs Inhibition and Sensory Quality of Waffles[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(11): 284-294. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021080330

· 分析检测 ·

莲原花青素对华夫饼 AGEs 的抑制及感官品质的影响

谈江莹, 陈紫婷, 秦佳斌, 王伊琳, 吴 茜*

(湖北工业大学生物工程与食品学院, 湖北武汉 430068)

摘要: 本文分析添加莲原花青素 (lotus seedpod procyanidins, LSPC) 对华夫饼晚期糖化终末产物 (advanced glycation end products, AGEs) 的抑制及感官品质的影响。以面粉、鸡蛋等为原料, 添加不同浓度 LSPC (0、0.5、1、2、4 mg/g) 并制备华夫饼 (170 °C, 20 min), 通过测量华夫饼中 AGEs 含量、羧甲基赖氨酸含量 (N^ε-Carboxymethyl lysine, CML)、抗氧化性等指标检测 LSPC 对华夫饼中 AGEs 的抑制作用; 通过色度, 质构, 气质, 电子鼻等方法检测 LSPC 对华夫饼感官品质的影响。结果表明, 华夫饼中 AGEs 含量和 CML 含量随 LSPC 浓度的增加而显著减少 ($P < 0.05$), 总酚含量随 LSPC 浓度的增加而显著增加 ($P < 0.05$); 华夫饼抗氧化性能随 LSPC 浓度的增加而显著增加 ($P < 0.05$); LSPC 的添加也影响了华夫饼的焙烤品质, 华夫饼的硬度显著下降 ($P < 0.05$), 弹性和凝聚性显著性增强 ($P < 0.05$); 华夫饼的色泽显著加深 ($P < 0.05$); 风味随莲原花青素的添加显著增加 ($P < 0.05$)。本研究表明莲原花青素对华夫饼中 AGEs 有抑制作用, 感官品质上使华夫饼口感更绵软可口, 同时本文为深入研究莲原花青素对食品热加工过程中 AGEs 的抑制作用及感官品质的影响提供理论支撑。

关键词: 华夫饼, 莲原花青素, 美拉德反应, 晚期糖化终末产物 (AGEs), 感官品质

中图分类号: TS254.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)11-0284-11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021080330



本文网刊:

Effects of Lotus Seedpod Procyanidins on AGEs Inhibition and Sensory Quality of Waffles

TAN Jiangying, CHEN Ziting, QIN Jiabin, WANG Yilin, WU Qian*

(College of Food and Biological Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: In this paper, the inhibition of advanced glycation end products (AGEs) and the effects of lotus seedpod procyanidins (LSPC) on sensory quality of waffles were analyzed for the first time. Using flour and eggs as raw materials, different concentrations of LSPC (0, 0.5, 1, 2, 4 mg/g) were added to prepare waffles (170 °C, 20 min). The inhibitory effect of LSPC on AGEs in waffles was detected by measuring the content of AGEs, carboxymethyl lysine content (CML), and antioxidant properties, while the effect of LSPC on the sensory quality of waffles was detected by chroma, texture, temperament, and electronic nose. The results showed that the contents of AGEs and CML in waffles decreased significantly with the increase of LSPC concentration ($P < 0.05$), and the content of total phenols increased significantly with the increase of LSPC concentration ($P < 0.05$); The antioxidant properties of waffles increased significantly with the increase of LSPC concentration ($P < 0.05$); The addition of LSPC also affected the baking quality of waffles. The hardness of waffles decreased significantly ($P < 0.05$), and the elasticity and cohesiveness increased significantly ($P < 0.05$); the color of the waffles was significantly deepened ($P < 0.05$); the flavor increased significantly with the addition of lotus seedpod procyanidins ($P < 0.05$). This study demonstrates that lotus seedpod procyanidins has an inhibitory effect on AGEs in waffles

收稿日期: 2021-08-30

基金项目: 国家自然科学基金 (32001705); 大学生创新创业训练计划项目 (201910500001)。

作者简介: 谈江莹 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品科学, E-mail: tan_jun25@163.com。

* 通信作者: 吴茜 (1988-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 食品科学, E-mail: wuqian@hbut.edu.cn。

and on sensory qualities, it makes the waffles mouth feel more spongy and palatable, at the same time, this paper provides a theoretical support for the in-depth study of the inhibitory effect of lotus seedpod procyanidins on AGEs and sensory quality during thermal processing of foods.

Key words: waffle; lotus seedpod procyanidins (LSPC); Maillard reaction; advanced glycation end products (AGEs); sensory quality

食品加工中发生美拉德反应所形成的潜在危害安全物质如丙烯酰胺(acrylamide, AA)、杂环胺(heterocyclic amines, HAs)和晚期糖化终末产物(advanced glycation end products, AGEs)等^[1]已受到广泛关注。AGEs 是经过美拉德反应中期、后期阶段形成的一类复杂化合物的总称,其形成和积累与衰老和糖尿病等多种疾病的发病机制有关。如 AGEs 与糖化终产物受体结合,诱导机体发生氧化应激与炎症反应^[2]; KATARÍNA 等^[3]已发现,过多地摄入热加工的食品会导致糖尿病,并诱发炎症,增强氧化应激,促进动脉粥样硬化的发生。此外,一系列的动物研究发现,老鼠食用富含 AGEs 的食物会引起尿蛋白增加^[4]和肾脏损伤等一系列问题。这些发现表明,饮食中 AGEs 可能被认为是威胁人类健康的慢性危险因素。因此,有必要了解食物中饮食 AGEs 的情况。

调控烘焙食品中美拉德反应产物 AGEs 的传统方法非常依赖于产品及加工参数(如温度)、成分(如前体含量、pH 和含水量)等,这些因素的变化或抑制剂的添加都会影响食品的质量^[5]。然而,近几年发现一种潜在的治疗方法,通过使用各种天然抗氧化剂,清除美拉德反应中形成 AGEs 的自由基,达到抑制 AGEs 生成的目的。目前发现可用于食品加工的 AGEs 抑制剂主要包括黄酮类、酚酸等多酚类物质^[6]。许多酚类化合物在模拟生理条件下具有抗糖化作用,如莲原花青素(LSPC)。莲原花青素是从莲科植物莲的成熟花托中分离的天然多酚类化合物,主要由(+)-儿茶素、(-)-表儿茶素和 B 型原花青素二聚体、三聚体、四聚体组成^[7]。LSPC 是国际公认的最有效的天然抗氧化剂,分子结构中的多元羟基赋予莲原花青素优良的抗氧化活性和与酶的结合能力^[8],并使其在体内发挥降血糖^[9]、抗肿瘤^[10]、抗炎^[11]、抗衰老^[12]、预防心血管疾病^[13]和抑制 AGEs 的生成^[14]的作用。

迄今为止,很少有研究全面评价酚类化合物与 AGEs 之间的抑制关系及感官品质的影响。华夫饼作为一种热加工食品,其中含有大量的糖类、蛋白质及脂类,在热加工过程中会发生剧烈的美拉德反应从而生成 AGEs。因此,本研究以添加不同 LSPC 浓度的华夫饼为研究对象,探究 LSPC 对华夫饼中 AGEs 抑制和感官品质的影响,为深入研究 LSPC 对食品热加工过程中 AGEs 抑制作用及感官品质影响提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

莲原花青素粗提物 华中农业大学食品科技学

院天然产物实验室提供,经 AB-8 大孔吸附树脂进一步纯化后,以葡萄籽原花青素为对照,采用盐酸-正丁醇法测得其原花青素含量为 98.87%(w/w);面粉、白砂糖、黄油、玉米淀粉 安琪酵母股份有限公司;鸡蛋 正大集团;德亚全脂纯牛奶 品渥食品股份有限公司;甲醇 色谱纯,瑞典 Oceanpak 试剂公司;甲酸 色谱纯,阿拉丁试剂(上海)有限公司;其他试剂均为分析纯或色谱纯,均来自上海麦克林生化科技有限公司。

ME3002/02 电子天平 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;CT15RE 离心机、F7000 荧光酶标仪 日本日立公司;XW-80A 微型涡旋混合仪 上海沪西分析仪器厂有限公司;UV-1601 紫外可分光光度计 北京瑞丽分析仪器有限公司;RF5301 荧光分光光度计 日本岛津公司;HH-8CJ 数显恒温磁力搅拌水浴锅 常州市金坛友联仪器研究所;FE20 型 pH 计 瑞士 Mettler-Toledo;RE-111 旋转蒸发器 瑞士 Buchi 公司;1260 型高效液相色谱联用仪 美国安捷伦科技有限公司;LSPCX 固体萃取柱、Eclipse Plus C₁₈ 色谱柱 Agela 科技公司;PEN3 便携式电子鼻系统 德国 Airsense 公司;7890A/5975C 气相色谱质谱联用仪 美国安捷伦公司;SPME 手动进样萃取头 美国 Supelco 公司;TA-XY2i 型质构仪 美国 Stable Micro System 有限公司;CM3500d 反射分光光度计 日本大阪的柯尼卡美能达传感公司。

1.2 实验方法

1.2.1 华夫饼的制备 根据杨军等^[15]的方法略有改动。所有华夫饼都用相同的原料制备。首先,分离两个鸡蛋的蛋清蛋黄,在蛋黄中加入 65 g 面粉,40 g 黄油,90 mL 牛奶,5 g 玉米淀粉后混合成蛋黄浆液;在蛋清中分三次加入 25 g 白砂糖,搅拌至硬性发泡。将搅拌好的蛋白霜分两次加入蛋黄浆液,以切拌方式搅拌均匀,在模具中分别倒入 20 g 华夫饼浆液。按表 1 分别将不同浓度 LSPC 溶于 1.5 mL 去离子水中搅拌均匀。然后将样品在 170 °C 下烘焙 20 min。

表 1 LSPC 添加量
Table 1 Content of LSPC

| 样品 | LSPC添加量(mg/g) |
|--------|---------------|
| LSPC-0 | 0 |
| LSPC-1 | 0.50 |
| LSPC-2 | 1.00 |
| LSPC-3 | 2.00 |
| LSPC-4 | 4.00 |

1.2.2 荧光 AGEs 抑制率的测定 根据 ZHANG 等^[16]的方法略有改动,用去离子水提取模型华夫饼(250 mg),并用 4.75 mL Carrez 溶液澄清(吐温-20, 0.05% v/v; SDS, 1% w/v; β -巯基乙醇, 5% v/v; Tris-HCl, 50 mmol/L, pH7.4),超声(300 W, 37 °C, 30 min),离心(3000 r/min, 10 min, 25 °C)并过滤(100 μ L)。使用酶标仪在 355/405 nm 的激发/发射波长下测定荧光 AGEs。不包含 LSPC 的反应溶液用作对照组。抑制率的计算公式为:

$$\text{抑制率(\%)} = \frac{F_{\text{对照}} - F_{\text{样品}}}{F_{\text{对照}}} \times 100$$

式中, $F_{\text{对照}}$ 表示对照组荧光 AGEs 强度, $F_{\text{样品}}$ 表示样品组荧光 AGEs 强度。

1.2.3 羧甲基赖氨酸含量(N^{ϵ} -(Carboxymethyl)lysine, CML)的测定

1.2.3.1 样品处理 根据 GENGJU 等^[17]的方法略有改动。在 4 °C 下,将 2 mL 0.2 mol/L 硼氢化钠(pH13~14)添加到模型华夫饼样品(500 mg)中 12 h。使用 4 mL 氯仿/甲醇(2:1, v/v)溶液对反应溶液进行脱脂,然后离心(在-4 °C 下 15000 r/min)1 h。随后,将盐酸混合至终浓度为 6 mol/L,并将样品在 110 °C 下水解 24 h。将最终的 CML 萃取液浓缩,直到用旋转蒸发仪干燥,然后溶解在 4 mL 硼酸钠缓冲液(0.2 mol/L, pH9.4)中,然后进行最终的膜过滤(尼龙, 0.45 μ m)。根据 SUN 等^[18]的方法,对 CML 处理测量方法进行了适当修改,将样品(15 μ L)注入 Eclipse Plus C₁₈ 色谱柱。

1.2.3.2 液相条件 流动相 A: 含 0.2% 甲酸的水溶液。流动相 B: 纯甲醇,流速 0.2 mL/min。梯度洗脱条件为 0~0.5 min 10%B, 0.5~4.0 min 10%~60%B。特征离子碎片 m/z 84 和 m/z 130 处的片段用于定性 CML(m/z 205)。用 CML 标准品外标曲线对样品中 CML 含量定量。通过 MassHunter Data 和 MassHunter Qualitative 对数据进行分析。

1.2.3.3 CML 抑制率计算 CML 的标准曲线方程为: $y=2 \times 10^6 x + 56683$, $R^2=0.9928$ 。

式中, x 表示 CML 浓度, $\mu\text{g/mL}$; y 表示 CML 的峰面积。

$$\text{CML抑制率(\%)} = \frac{X_{\text{样品}} - X_{\text{对照}}}{X_{\text{对照}}} \times 100$$

式中, $X_{\text{样品}}$ 表示 LSPC-1、LSPC-2、LSPC-3、LSPC-4 样品组 CML 浓度, $\mu\text{g/mL}$; $X_{\text{对照}}$ 表示 LSPC-0 样品组 CML 浓度, $\mu\text{g/mL}$ 。

1.2.4 总酚含量的测定 参照 LI 等^[19]的方法略有改动,提取华夫饼中总酚。样品溶于 50% 乙醇溶液(1:1, v/v),超声溶解(37 °C, 1 h),离心(25 °C, 3000 r/min, 5 min),分离固液相,保留上清液,取样液(1.5 mL)与福林酚试剂(1.5 mL)混合静置 3 min,再加入碳酸钠溶液(15%, 1 mL),静置 30 min,离心后

(25 °C, 3500 r/min, 3 min),收集上清液,以 15% 碳酸钠溶液为空白,测定 760 nm 处的吸光度。标准曲线: $y=0.0336x+0.0901$, $R^2=0.9288$ 。

式中, x 表示总酚含量(mg), y 表示 760 nm 下测得的吸光值。

1.2.5 正丁醇-盐酸法测定莲原花青素消耗率 将华夫饼粉末(500 mg)与 25 mL 甲醇混合,超声处理(37 °C, 30 min),离心后(3000 r/min, 5 min, 25 °C)过滤(1 mL)。取上清液,将其转移至带塞子的 10 mL 试管中,依次添加 0.2 mL 硫酸铁铵溶液和 6 mL 正丁醇-盐酸溶液,并充分摇匀。将反应溶液在 95~97 °C 的水浴中浓缩回流 40 min 后,迅速用冷水冷却,并在 546 nm 波长处测量吸光度。基于吸光度和浓度之间的关系绘制标准曲线,以计算残留的 LSPC 的量。用甲醇代替样品作为空白对照。消耗率的计算公式为:

$$\text{消耗率(\%)} = \frac{F_{\text{对照}} - F_{\text{样品}}}{F_{\text{对照}}} \times 100$$

式中, $F_{\text{对照}}$ 表示对照组 LSPC 含量(mg), $F_{\text{样品}}$ 表示样品组 LSPC 含量(mg)。

1.2.6 抗氧化活性测定

1.2.6.1 DPPH 自由基清除率 根据 SING 等^[20]的方法略有修改,估算了每种华夫饼提取物的 DPPH 自由基清除能力。将华夫饼粉末(200 mg)与 10 mL 去离子水混合,超声处理(37 °C, 60 min),离心(3000 r/min, 5 min, 25 °C)并过滤(1 mL)。在试管中将酚提取物样品(0.2 mL)或 0.2 mL 去离子水(空白)与 3.8 mL 0.1 mmol/L DPPH-乙醇溶液混合。将 DPPH-乙醇溶液替换为乙醇溶液作为对照或调零。将样品在室温下黑暗中静置 2 h 后在 517 nm 下测量吸光度。

$$\text{DPPH自由基清除率(\%)} = \left(1 - \frac{A_{\text{样品}} - A_{\text{对照}}}{A_{\text{空白}}}\right) \times 100$$

式中, $A_{\text{样品}}$ 表示样品组吸光值, $A_{\text{对照}}$ 表示对照组吸光值, $A_{\text{空白}}$ 表示空白组吸光值。

1.2.6.2 ABTS 自由基清除率 根据 THAIPONG 等^[21]的方法略有修改。将华夫饼粉末(200 mg)与 10 mL 去离子水混合,超声(37 °C, 60 min),离心(3000 r/min, 5 min, 25 °C)并过滤。储备溶液包括 2.6 mmol/L 过硫酸钾溶液和 7.4 mmol/L ABTS 溶液。然后通过将两种储备溶液等量混合并在室温下于黑暗中反应 12 h 来制备工作溶液。通过使用分光光度计将 21 mL 去离子水与 1 mL ABTS⁺溶液混合来稀释溶液,以在 734 nm 处获得 0.70 \pm 0.02 单位的吸光度。每次测定前制备新鲜的 ABTS⁺溶液。使酚提取物(100 μ L)与 400 μ L 的 ABTS⁺溶液反应。用乙醇溶液代替酚提取物样品作为空白。然后使用酶标仪在 734 nm 处测定吸光度。

$$\text{ABTS自由基清除率(\%)} = \left(1 - \frac{A_{\text{样品}}}{A_{\text{空白}}}\right) \times 100$$

式中, $A_{\text{样品}}$ 表示样品组吸光值, $A_{\text{空白}}$ 表示空白组吸光值。

1.2.6.3 FRAP 铁离子还原能力 使用 ERDOGAN-ORHAN 等^[22] 的方法略有修改测试了还原铁的能力。将华夫饼粉末(200 mg)与 10 mL 去离子水混合, 超声(37 °C, 60 min), 离心(3000 r/min, 5 min, 25 °C)并过滤(1 mL)。在试管中将酚提取物样品(100 μ L)与 300 μ L 去离子水混合。然后加入 3 mL 工作液(100 mL 乙酸钠缓冲液, 10 mL 10 mmol/L TPTZ 溶液和 10 mL 20 mmol/L FeCl₃ 溶液)。用去离子水代替工作液作为对照。用去离子水代替酚提取物样品作为空白。剧烈摇动混合物后, 将样品在 37 °C 水浴锅中加热 4 min。将 200 μ L 反应溶液加入到酶标仪中, 并在 593 nm 处测量吸光度。

$$\text{铁离子还原能力(\%)} = \frac{A_{\text{样品}} - A_{\text{对照}}}{A_{\text{空白}}} \times 100$$

式中, $A_{\text{样品}}$ 表示样品组吸光值, $A_{\text{对照}}$ 表示对照组吸光值, $A_{\text{空白}}$ 表示空白组吸光值。

1.2.6.4 羟自由基清除率 根据 LI 等^[23] 的方法略有修改, 对每种华夫饼提取物的羟自由基清除能力进行了估算。将模型华夫饼(200 mg)与 10 mL 去离子水混合, 超声(37 °C, 60 min), 离心(3000 r/min, 5 min, 25 °C)并过滤(2 mL)。在试管中将酚提取物样品(1.5 mL)或 1.5 mL 去离子水(空白)与 1.5 mL 9 mmol/L 水杨酸-乙醇溶液混合。然后, 加入 1.5 mL H₂O₂ (8.8 mmol/L)和 1.5 mL FeSO₄ (9 mmol/L)。用去离子水代替 FeSO₄ 溶液作为对照。去离子水用于调零。充分混合后, 将样品在 37 °C 的水浴箱中加热 10 min。将 200 μ L 反应溶液加入到酶标仪中, 并在 510 nm 处测量吸光度。

$$\text{羟自由基清除率(\%)} = \left(1 - \frac{A_{\text{样品}} - A_{\text{对照}}}{A_{\text{空白}}}\right) \times 100$$

式中, $A_{\text{样品}}$ 表示样品组吸光值, $A_{\text{对照}}$ 表示对照组吸光值, $A_{\text{空白}}$ 表示空白组吸光值。

1.2.7 水分的测定

1.2.7.1 水分含量的测定 使用水分含量仪(200 mg, 105 °C)测定样品的水分含量。

1.2.7.2 水分活度的测定 使用便携式水分活度仪在 25 °C 下测定水分活度。

1.2.7.3 低场核磁的测定 根据 CAO 等^[24] 描述的方法稍作调整进行 NMR 测量。将样品放入 15 mm×200 mm 的核磁管中, 并置于 LF-NMR 分析仪中。该测试是在 100 kHz 的谐振频率下进行的。横向(T₂)弛豫是通过 Carr-Purcell-Meiboom-Gill 脉冲序列获得的, 该序列具有 4 个扫描和 12000 个回波。两次连续扫描之间的重复时间为 3 s, 脉冲之间的 τ 值为 250 μ s, 分别为 90°和 180°。T₂ 分布是通过 MultiExp Inv 分析软件获得的。整个过程在 20 °C 下进行三次重复。

1.2.8 pH 测定 将华夫饼粉末(250 mg)与 25 mL 水混合并涡旋 3 min。将混合物在室温下保持 1 h 以分离固相和液相。小心除去上清液层后, 使用 pH 计测定 pH。

1.2.9 华夫饼质构分析 根据王丽莎等^[25] 的方法稍加改动, 测量华夫饼质构。采用纹理分析仪的 P/36R 圆柱探头, 按样品标记顺序进行测量。测量前探针离样品越近越好。压缩实验参数设置如下: 工作模式为 TPA 方案; 探针诱导 5 g; 测量前后中速度为 5 mm/s; 目标模式应变为 50%; 数据采集点为 500 pps, 记录硬度、弹性、凝聚力、胶粘性、咀嚼性和回弹性等纹理参数。

1.2.10 色度测定 根据谷满屯等^[26] 的方法稍加改进测量华夫饼色度。华夫饼的颜色用 CM-3500d 反射分光光度计进行测量, 结果用 CIE Lab 色彩系统表示。在华夫饼表面的不同区域对 a^* (红色), b^* (黄色)和 L^* (亮度)参数进行了三个独立的测量。根据等式 $E = \sqrt{L^{*2} + a^{*2} + b^{*2}}$ 计算 E 值。用标准校准白板 CRA43($L^*=93.80$; $a^*=0.3156$; $b^*=0.3319$)校准设备。

1.2.11 电子鼻分析 根据贾洪锋等^[27] 的方法稍作调整, 测量华夫饼电子鼻。称量 1 g 华夫饼粉末, 将其放入 20 mL 样品瓶中, 添加适量 10% 生理盐水以完全润湿样品, 密封样品瓶, 在 37 °C 水浴中加热 30 min。使用 PEN3 电子鼻进行风味检测。电子鼻测试条件: 样品测试时间 200 s, 采样间隔 1 s, 清洁时间 120 s, 复位时间 10 s, 内部流速 300 mL/min, 样品流速 300 mL/min。对所有样品重复测量 3 次。使用 PEN3 电子鼻头随附的数据处理软件对数据执行主成分分析。

1.2.12 华夫饼挥发性成分 GC-MS 测定

1.2.12.1 样品预处理 根据 LU 等^[28] 的方法稍加改进测量华夫饼气质。称量 1 g 华夫饼粉末到 20 mL 顶空微萃取样品瓶中, 放入转子中, 添加 1 g 氯化钠粉末以促进风味成分挥发, 盖上盖子, 插入萃取头以固定。在磁力搅拌下于 60 °C 的恒温水浴中平衡 30 min 后, 向下推光纤头继续萃取 10 min, 清理光纤头, 拔下萃取头的插头, 然后插入气相色谱仪的入口。

1.2.12.2 GC 条件 HP-5MS 毛细管柱(30 m×0.25 mm×0.25 μ m); 载气(He)流速 1.0 mL/min; 不分流进样; 入口温度 250 °C; 升温程序: 柱初始温度在 40 °C 保持 2 min, 以 4 °C/min 升至 160 °C, 保持 1 min, 然后以 10 °C/min 升至 250 °C, 保持 5 min。

1.2.12.3 MS 条件 电子电离源; 电子能量 70 eV; 离子源温度 230 °C; GC-MS 界面温度 280 °C; 四极温度 150 °C; 质量扫描范围 m/z 30~550。

1.3 数据处理

运用 IBM SPSS Statistics 21 软件对数据进行统计分析, 结果以 $\bar{x} \pm s$ 表示, 通过一元方差分析(One-Way ANOVA)进行多个组间平均数的比较, 如果组

间存在显著性差异($P<0.05$),则采用 Duncan 检验进行组间多重比较。利用 Origin 8.0 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 莲原花青素对华夫饼荧光 AGEs 抑制率和 CML 抑制率的影响

目前已发现的 AGEs 有 20 种,依据荧光特性可分为荧光 AGEs 和非荧光 AGEs,其中,CML 是非荧光 AGEs 的重要代表^[29]。一方面 CML 能与蛋白质产生交联,进而改变一些基质蛋白分子的正常功能,另一方面,CML 还能与特异受体结合,通过生理反应来改变蛋白质和细胞功能,从而导致机体的病理变化^[30]。由图 1a 二级质谱图所示,84 m/z 的主离子碎片可以确定 LSPC-3 华夫饼样品中存在确定 CML,由图 1b 提取离子流色谱图所示,可以定量 LSPC-3 华夫饼样品中 CML 峰面积,从而计算 CML 含量。

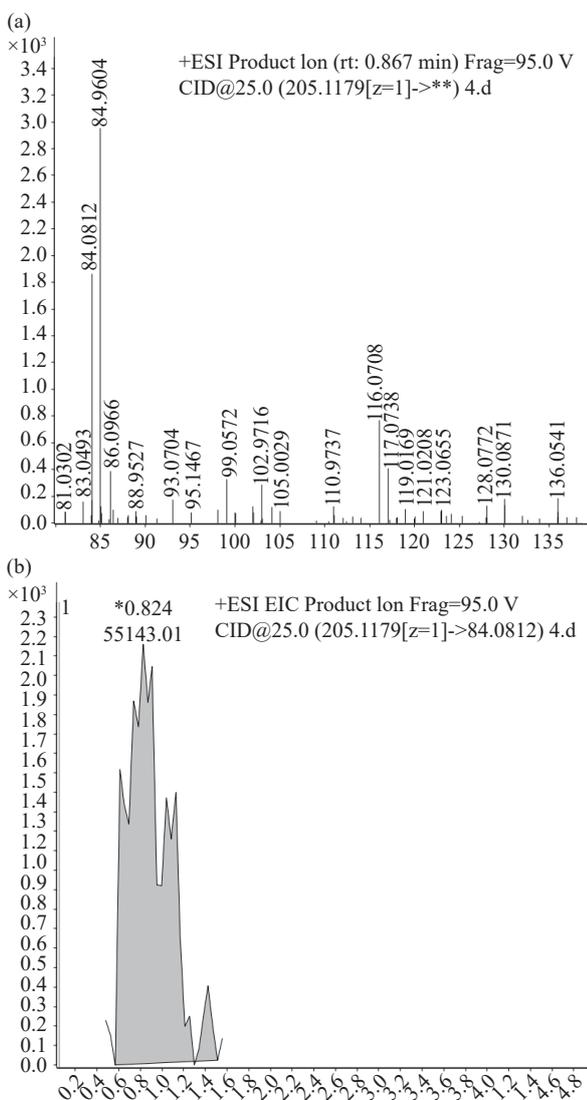


图 1 LSPC-3 华夫饼的二级质谱图和提取离子流色谱图
Fig.1 Secondary mass spectrometry and extract ion chromatography of LSPC-3 waffle

如图 2 所示,添加不同浓度 LSPC 华夫饼中,荧光 AGEs 抑制率和 CML 抑制率都随 LSPC 浓度的增加而呈上升趋势,呈现剂量依赖性(荧光 AGEs 抑

制率的 $R^2=0.993$, CML 抑制率的 $R^2=0.997$)且有显著性影响($P<0.05$)。其中,LSPC-4 样品的荧光 AGEs 抑制率和 CML 抑制率最高,分别为(40.53%±1.43%)、(72.08%±0.79%)。这表明随华夫饼中 LSPC 浓度的增加,LSPC 与华夫饼中蛋白质、糖类等发生作用,因此,美拉德反应物一定程度上有所减少,生成的荧光 AGEs 含量和 CML 含量都相应减少,荧光 AGEs 抑制率和 CML 抑制率增高。同时,LSPC 作为天然抗氧化剂具有抗氧化作用,可以有效抑制美拉德反应中的氧化反应,从而抑制美拉德反应中有害 AGEs 的生成。由此可见,在一定浓度范围内,LSPC 浓度越高,其对荧光 AGEs 和 CML 抑制作用越强,在食品中添加一定浓度的 LSPC 可以有效抑制 AGEs 的生成。

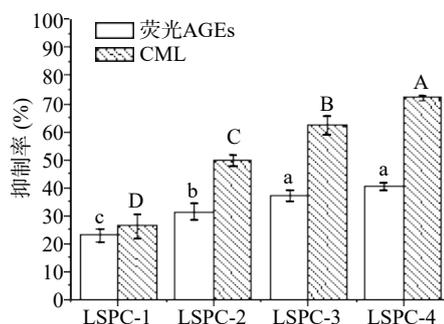


图 2 不同浓度 LSPC 对华夫饼中 AGEs 及 CML 的抑制率的影响

Fig.2 Effects of different concentrations of LSPC on inhibition rate of AGEs and CML in waffles

注:不同小写字母代表 AGEs 抑制率差异显著($P<0.05$);不同大写字母表示 CML 抑制率差异显著($P<0.05$)。

2.2 莲原花青素对华夫饼总酚含量的影响

LSPC 是植物中广泛存在的一大类多酚类化合物的总称^[31]。如图 3 所示,添加不同浓度 LSPC 华夫饼的总酚含量范围为 9.21~13.23 mg/g。在没有添加 LSPC 的 LSPC-0 样品中仍含有总酚,即华夫饼其本身含有某些种类的酚类物质。在加入 4.0 mg/g 的 LSPC 后,总酚含量出现显著性增加($P<0.05$)。总酚含量的增加主要是剩余 LSPC 的量,尽管 LSPC 绝大部分被消耗,但是存在一定的剩余。

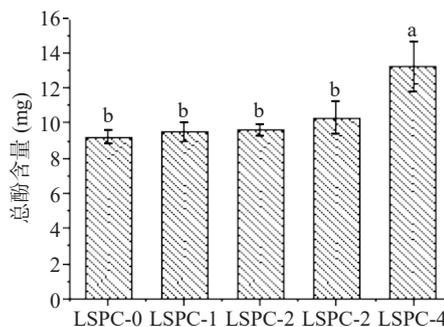


图 3 不同浓度 LSPC 对华夫饼中总酚含量的影响

Fig.3 Effects of different concentrations of LSPC on total phenol content in waffles

注:不同小写字母表示差异显著($P<0.05$);图 4、图 8 同。

2.3 莲原花青素对华夫饼莲原花青素消耗率的影响

如图 4 所示, 添加不同浓度 LSPC 华夫饼中, LSPC 消耗率随 LSPC 浓度增加而呈上升趋势, 呈现剂量依赖性($R^2=0.998$)且有显著影响($P<0.05$)。其中, LSPC-4 样品的消耗率为(88.82%±0.05%), 表现最高。结合图 2 结论: LSPC 浓度增加, 其对美拉德反应产物 AGEs 和 CML 的抑制效果增强, 推测随 LSPC 浓度的增加, 与美拉德反应物作用的 LSPC 和抑制美拉德反应中氧化反应的 LSPC 逐渐增加, 因此, 抑制美拉德反应产物 AGEs 和 CML 生成的能力越强。但同时温度对 LSPC 影响较大, 随加热时间的延长, LSPC 含量在不同程度上有所降低^[32]。因此, LSPC 消耗的原因既可能是由于抑制美拉德反应消耗, 也可能是由于加热过程中自身消耗或与其它组分相互作用。

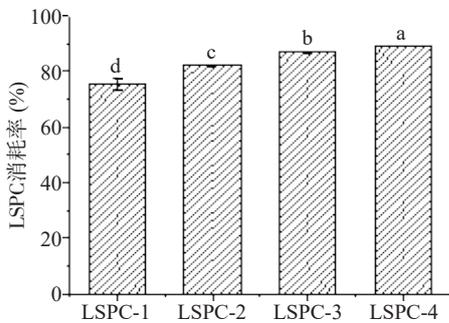


图 4 不同浓度 LSPC 对华夫饼中 LSPC 消耗率的影响
Fig.4 Effect of different concentrations of LSPC on consumption ratio of LSPC in waffles

2.4 莲原花青素对华夫饼抗氧化活性的影响

糖化过程易产生 AGEs, 而自由基及氧化应激能加速糖基化的进程, 因此, 研究 LSPC 对华夫饼中 DPPH 自由基清除能力、ABTS 自由基清除能力、FRAP 铁离子还原能力以及羟自由基清除能力的影响。

如图 5 所示, 在添加一定浓度范围的 LSPC 华夫饼中, DPPH 自由基清除能力、ABTS 自由基清除能力、FRAP 铁离子还原能力以及羟自由基清除能力基本呈上升趋势。其中, 最显著的是 DPPH 自由

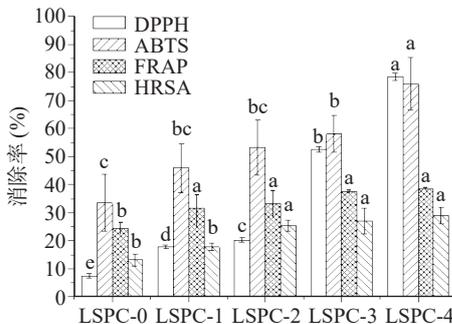


图 5 不同浓度 LSPC 对华夫饼中抗氧化性的影响
Fig.5 Effects of different concentrations of LSPC on antioxidant properties in waffles

注: HRSA 指羟自由基清除率; 不同小写字母表示组间(同一抗氧化指标)差异显著($P<0.05$)。

基清除能力, 随 LSPC 浓度增加, 其显著增加($P<0.05$)。添加 LSPC 后华夫饼的 FRAP 铁离子还原能力以及羟自由基清除能力与未添加 LSPC 的华夫饼相比也有显著差异($P<0.05$)。

综上, 抗氧化能力最强的为 LSPC-4 样品组, 其总酚含量对应也是最高的。这表明, 总酚含量与抗氧化能力存在一定的关系且在本实验研究呈现出正相关^[33]。这也与其它研究结果一致: 样品中的 DPPH 自由基的清除率与多酚含量呈正相关关系, 而且关系极显著。尽管多酚类物质可能与蛋白质消化产生肽相互作用, 但仍具有较高的清除自由基的能力^[34]。因此, 多酚物质的存在在一定程度上有利于提高华夫饼的抗氧化能力。

同时, 抗氧化能力直接影响美拉德反应中的氧化反应。在实验浓度范围内, LSPC 浓度越高, 其抗氧化能力越强, 从而抑制美拉德反应中氧化反应能力越强, 抑制 AGEs 生成的能力越强, 即 AGEs 抑制率越高, 与上述实验结论也相符。因此, 可推测 LSPC 抑制 AGEs 生成的部分机理可能与酚类物质的抗氧化活性提高食品的抗氧化性有关。

2.5 莲原花青素对华夫饼水分变化的影响

美拉德反应是生成 AGEs 的重要途径, 而水分含量、水分活度以及水分存在形式都有可能影响到美拉德反应。因而, 研究 LSPC 的加入对华夫饼体系中水分含量、水分活度以及水分存在形式的影响。

如图 6 所示, 添加不同浓度 LSPC 后各华夫饼样品组的水分活度无显著差异($P>0.05$)。这表明在实验浓度范围中, LSPC 不影响华夫饼中水分活度。其次, 添加高浓度 LSPC 的华夫饼样品 LSPC-3 和 LSPC-4, 相较于未添加 LSPC 或添加低浓度 LSPC 的华夫饼, 其水分含量有显著性下降($P<0.05$)。由此推测, 添加 LSPC 后, 水更易与小分子多酚类物质结合, 从而降低水分含量^[35]。

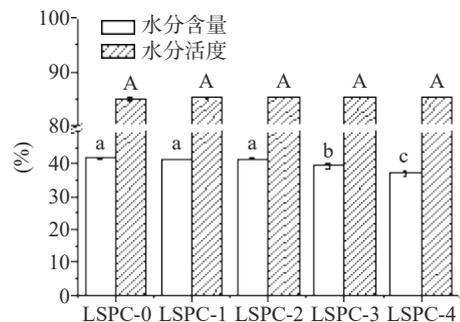


图 6 不同浓度 LSPC 对华夫饼中水分含量及水分活度的影响

Fig.6 Effects of different concentrations of LSPC on water content and water activity in waffles

注: 不同小写字母代表水分含量差异显著($P<0.05$); 不同大写字母表示水分活度差异显著($P<0.05$)。

由 NMR 原理可知, 质子所处的化学环境不同, 其弛豫时间 T_2 的长短便不相同, 水分的自由度也不

同^[36-37]。弛豫时间 T_2 越短表明水与物质结合越紧密,说明质子自由度越低,越难排出;弛豫时间 T_2 越长说明质子自由度越高,越容易排出,因此,弛豫时间 T_2 可以间接反映水分的相态特征^[38-39]。不同弛豫时间 T_2 波峰所覆盖的信号幅值,即弛豫时间 T_2 区间的积分面积可表示各个区间氢质子的相对含量,实现对不同相态水分的定量测定。弛豫时间 T_2 的变化能够反映水分子的流动性,因此可以了解添加不同含量 LSPC 华夫饼中水分的迁移规律。

如图 7 所示,华夫饼的 T_2 图谱中包含多个峰,即说明华夫饼内部含有多组分水,其中,0.1~10 ms 区间内的峰表示华夫饼中流动性最差的结合水,10~100 ms 区间内的峰表示华夫饼中的不易流动水,而 100~1000 ms 范围内的峰表示华夫饼中可以自由流动的自由水^[40]。而且,不易流动水对应的信号增幅最大,在实验浓度范围,其随 LSPC 浓度增加逐渐下降。这表明,在实验浓度范围内,不易流动水含量随 LSPC 浓度增大而减少,这与图 6 所示高浓度 LSPC 华夫饼中水分含量有所下降相吻合。

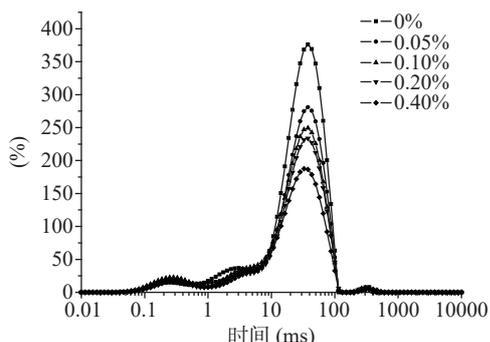


图 7 不同浓度 LSPC 对华夫饼弛豫时间的影响

Fig.7 Effects of different concentrations of LSPC on low field NMR in waffles

由上述结果可知,添加 LSPC 对华夫饼中水分活度并无影响,但华夫饼中不易流动水含量有所减少,同时水分含量也相应减少。推测 LSPC 可能通过影响华夫饼中水分的分布和迁移来影响水分含量,从而影响美拉德反应过程以抑制 AGEs 的生成。

2.6 莲原花青素对华夫饼 pH 的影响

pH 是美拉德反应中的重要影响因素。如图 8 所示,添加不同浓度 LSPC 的华夫饼中,其 pH 无显著差异($P>0.05$),均在 7.95~8.00 之间,这与 NAVARRO 等^[41]的研究结果一致。这表明,添加 LSPC 并不影响华夫饼的 pH,并非通过改变 pH 来抑制美拉德反应生成的 AGEs。

2.7 莲原花青素对华夫饼色度的影响

添加 LSPC 后的华夫饼肉眼可见颜色有所变化,因此采用色度仪对其进行更客观测量。色度仪中 L^* 表示华夫饼的明暗, L^* 越小,华夫饼越暗; a^* 表示华夫饼的红绿, a^* 越大,华夫饼红色越多; b^* 表示华夫饼的黄蓝, b^* 越小,华夫饼越蓝。如图 9 所示,在实验浓度范围内,随 LSPC 的增加,华夫饼颜色更暗、更

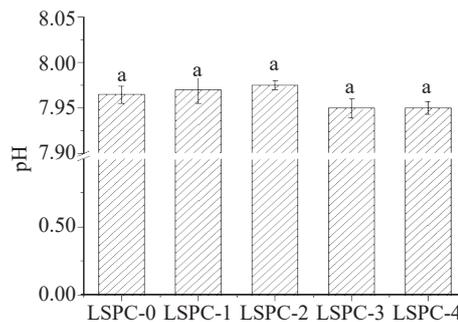


图 8 不同浓度 LSPC 对华夫饼 pH 的影响

Fig.8 Effects of different concentrations of LSPC on pH in waffles

红^[42]、更蓝,且颜色有显著差异性($P<0.05$)。这种现象推测是 LSPC 虽然会影响美拉德反应所产生的褐变产物,从而对华夫饼外观颜色有一定影响,但 LSPC 本身颜色为红褐色,颜色较深,加入后使华夫饼外观颜色更偏红,颜色加深,亮度减暗。

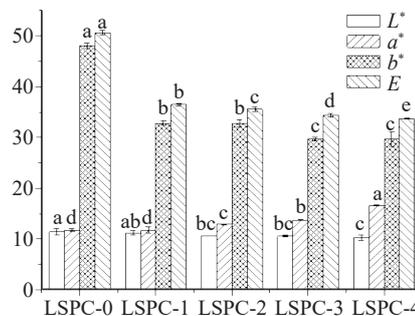


图 9 不同浓度 LSPC 对华夫饼色度的影响

Fig.9 Effects of different concentrations of LSPC on chroma in waffles

注:不同小写字母表示组间(同一色度指标)差异显著($P<0.05$)。

2.8 莲原花青素对华夫饼质构的影响

如表 2 所示,对硬度,添加 1 mg/g 以上浓度 LSPC 华夫饼硬度较未添加和添加 0.50 mg/g 浓度 LSPC 华夫饼有显著性降低($P<0.05$),这表明添加较高浓度 LSPC 能有效增加华夫饼的柔软性;对弹性和凝聚性,添加 4 mg/g 浓度 LSPC 华夫饼有显著性增加($P<0.05$),这表明高浓度 LSPC 华夫饼弹性和凝聚性更好;对胶粘性、咀嚼性、回复性,添加 LSPC 与未添加 LSPC 华夫饼无显著性差异($P>0.05$),这表明 LSPC 对华夫饼的胶粘性、咀嚼性、回复性无影响。综上,高浓度华夫饼硬度更小更柔软,弹性和凝聚性更好,可以认为高浓度 LSPC 华夫饼品质更好。

2.9 莲原花青素对华夫饼电子鼻 PCA 的影响分析

电子鼻是一种利用传感器对样品中不同气体成分进行分析,能够感知和识别气味,进行气味检测的智能系统,具有类似鼻子的功能^[43]。本研究采用的 PEN3 型电子鼻是一种金属氧化物传感器型的电子鼻,具有 10 个金属氧化物气体传感器阵列,如表 3 所示。

表 2 不同浓度 LSPC 华夫饼质构分析

Table 2 Texture analysis of waffles with different concentrations of LSPC

| | LSPC-0 | LSPC-1 | LSPC-2 | LSPC-3 | LSPC-4 |
|-----|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 硬度 | 1608.38±74.86 ^a | 1630.11±20.54 ^a | 1438.79±39.34 ^b | 1441.94±27.87 ^b | 1382.47±86.12 ^c |
| 弹性 | 0.9920±0.0026 ^b | 0.9923±0.0029 ^b | 0.9923±0.0029 ^b | 0.9927±0.0032 ^b | 1.0237±0.0225 ^a |
| 凝聚性 | 0.7650±0.0061 ^b | 0.7717±0.0084 ^b | 0.7717±0.0055 ^b | 0.7623±0.0015 ^b | 0.7850±0.0052 ^a |
| 胶粘性 | 1210.54±65.20 ^a | 1241.92±12.78 ^a | 1093.87±13.81 ^a | 1126.54±33.24 ^a | 1357.68±263.44 ^a |
| 咀嚼性 | 1269.47±70.60 ^a | 1230.05±17.40 ^a | 1093.87±13.81 ^a | 1232.48±123.03 ^a | 1370.52±373.78 ^a |
| 回复性 | 0.5233±0.0119 ^a | 0.5667±0.0122 ^a | 0.5567±0.0074 ^a | 0.5390±0.0080 ^a | 0.5690±0.0066 ^a |

注: 同行不同字母表示差异显著(P<0.05)。

表 3 PEN3 型电子鼻传感器敏感物质

Table 3 Sensitive substances of PEN3 electronic nose sensor

| 序号 | 传感器名称 | 性能描述 |
|----|-------|----------------|
| 1 | W1C | 对芳烃成分, 苯类灵敏 |
| 2 | W5S | 灵敏度大, 对氮氧化物敏感 |
| 3 | W3C | 对芳香成分灵敏, 氨类敏感 |
| 4 | W6S | 主要对氢类敏感 |
| 5 | W5C | 对短链烷烃、芳香成分敏感 |
| 6 | W1S | 对甲基类灵敏 |
| 7 | W1W | 对硫化物灵敏 |
| 8 | W2S | 对醇类、醛酮类灵敏 |
| 9 | W2W | 对芳香成分, 有机硫化物灵敏 |
| 10 | W3S | 对长链烷烃灵敏 |

主成分分析(principal component analysis, PCA)是将研究对象的复杂多指标问题通过特定方式的数据转换, 转化为简单且较少数量综合指标的一种重要统计方法, 这些综合指标之间既互不相关又能最大化提供研究对象原有指标所反映的绝大部分信息, 并能快速实现模式或关系的可视化识别。

如图 10 所示, PC₁ 贡献率为 76.93%, PC₂ 贡献率为 21.41%, 总贡献率达到 98.34%, 说明 PCA 可用于区分不同含量 LSPC 华夫饼的挥发性气味。在相同的实验条件下, 不同添加量的 LSPC 华夫饼区分度较明显, 0.5、1.0、2.0 和 4.0 mg/g LSPC 华夫饼的气味呈现一定的聚类现象, 但仍能够有效区分, 且不同含量均在各自区域, 不发生重叠, 说明各组华夫饼之间均存在差异, 具有一定的研究价值。电子鼻是一种快速区分不同挥发组分风味差异的有效工具, 但对于不同华夫饼之间风味差异物质的表征还有待通过固相微萃取气相色谱-质谱联用技术进一步研究^[44]。

表 4 GC-MS 分析风味物质种类

Table 4 Flavor substances analysis by GC-MS

| 分类 | LSPC-0 | | LSPC-1 | | LSPC-2 | | LSPC-3 | | LSPC-4 | |
|----|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|
| | 种类 | 相对含量(%) |
| 烃类 | 10 | 50.48 | 9 | 35.54 | 2 | 15.61 | 3 | 20.42 | 4 | 4.40 |
| 酚类 | 1 | 42.66 | 0 | 0.00 | 0 | 0.00 | 0 | 0.00 | 0 | 0.00 |
| 醛类 | 1 | 6.86 | 0 | 0.00 | 0 | 0.00 | 0 | 0.00 | 0 | 0.00 |
| 酮类 | 0 | 0.00 | 1 | 6.55 | 1 | 6.74 | 2 | 10.79 | 1 | 3.34 |
| 酯类 | 0 | 0.00 | 3 | 9.44 | 0 | 0.00 | 0 | 0.00 | 4 | 2.99 |
| 酸类 | 0 | 0.00 | 2 | 48.48 | 4 | 77.64 | 3 | 68.79 | 6 | 89.27 |

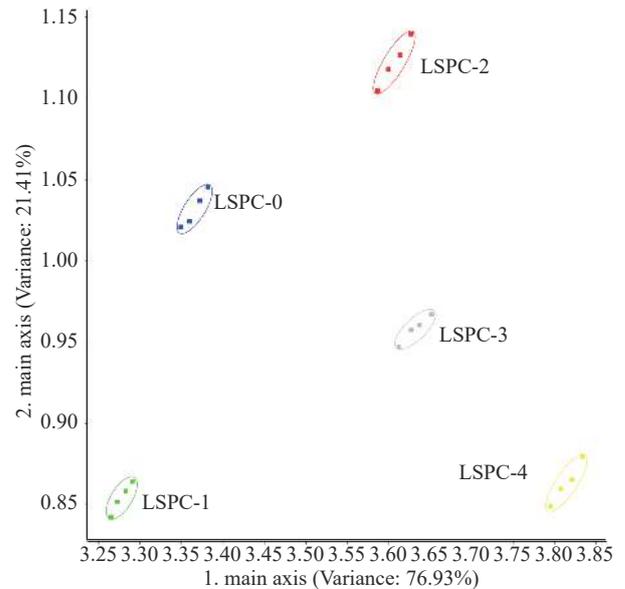


图 10 不同浓度 LSPC 对华夫饼电子鼻 PCA 分析

Fig.10 PCA analysis of waffle electronic nose with different concentrations of LSPC

2.10 莲原花青素对华夫饼挥发成分气质的 GC-MS 影响分析

利用 GC-MS 在添加不同 LSPC 浓度华夫饼中共检测出 36 种挥发性化合物。如表 4 所示, LSPC-0 样品检测出 12 种挥发性化合物, 其中, 酚类物质 1 种, 相对含量为 42.66%; 醛类物质 1 种, 相对含量为 6.86%。LSPC-1、LSPC-2、LSPC-3 和 LSPC-4 分别检测出 15 种、7 种、8 种和 15 种, 均无酚类物质和醛类物质。这表明, 随 LSPC 的添加, 使酚类消耗更多, 醛类相对含量减少。而醛类物质是产生 AGEs 的前体物质, 间接说明华夫饼中 AGEs 的减少, 提高

了华夫饼的质量安全^[45]。酯类化合物是酸、醇在高温作用下生成的产物,为华夫饼带来果香气和奶气^[46],添加 LSPC 后,酯类含量有一定程度地增加,提高了华夫饼的感官品质。

3 结论

本研究通过添加不同浓度的 LSPC 研究 LSPC 对华夫饼烘焙过程中美拉德反应 AGEs 的抑制作用及感官品质的影响。实验浓度范围内,随 LSPC 浓度增加,华夫饼中 AGEs 的抑制作用及抗氧化作用呈增加趋势,这表明 LSPC 能有效抑制华夫饼中 AGEs 的形成。感官品质上,随 LSPC 浓度的增加,华夫饼色泽逐渐呈棕色,提高食欲。质构分析表明华夫饼添加 LSPC 后硬度下降,弹性和凝聚性增强,口感上更为软绵香甜。电子鼻 PCA 分析和 GC-MS 分析结果显示,不同 LSPC 浓度华夫饼的风味存在明显差异,随 LSPC 浓度增加,酚类、醛类物质含量减少,酯类物质含量增加。综上,将 LSPC 添加至华夫饼中,不仅提高了华夫饼的抗氧化活性,抑制了美拉德反应有害物质 AGEs 的生成,同时其感官品质也有一定程度的提升,这使其可能成为一种未来大众膳食中的营养选择。

参考文献

[1] 杨调调,何志勇,秦昉,等.美拉德反应对产品风味品质的影响及其衍生危害物研究进展[J].食品安全质量检测学报,2017(3):134-141. [YANG Tiaotiao, HE Zhiyong, QIN Fang, et al. Research progress of Maillard reaction on flavor quality of products and its derivatives[J]. Journal of Food Safety and Quality Inspection, 2017(3): 134-141.]

[2] 申超. FPS-ZM1 对晚期糖基化终末产物诱导的鼠小胶质细胞炎症和氧化应激的影响及机制[D]. 济南: 山东大学, 2016. [SHEN Chao. Effect and mechanism of FPS-ZM1 on rat microglia inflammation and oxidative stress induced by advanced glycation end products[D]. Jinan: Shandong University, 2016.]

[3] KATARÍNA EBEKOVÁ, SOMOZA V. Dietary advanced glycation endproducts (AGEs) and their health effects-PRO[J]. Molecular Nutrition & Food Research, 2010, 51(9): 1079-1084.

[4] FENG J X, HOU F F, LIANG M, et al. Restricted intake of dietary advanced glycation end products retards renal progression in the remnant kidney model[J]. *Kidney International*, 2007, 71(9): 901-911.

[5] GOLDBERG T, CAI W, PEPPA M, et al. Advanced glycoxidation end products in commonly consumed foods[J]. *Journal of the American Dietetic Association*, 2004, 104(8): 1287-1291.

[6] 孔盈斐,梁迎岗,熊前进,等.多酚对食源性晚期糖化终末产物及其诱导的相关疾病的抑制作用[J/OL]. 食品科学: 1-19 [2021-08-07]. <http://202.114.181.48:80/rwt/CNKI/http/NNYHGLUDN3WXTLUPMW4A/kcms/detail/11.2206.ts.20210531.1359.020.htmL>. [KONG Yingfei, LIANG Yinggang, XIONG Qianjin, et al. Inhibitory effect of polyphenols on foodborne advanced glycation end products and related diseases[J/OL]. Food Science: 1-19 [2021-08-07]. <http://202.114.181.48:80/rwt/CNKI/http/NNYHGLUDN3WXTLUPMW4A/kcms/detail/11.2206.ts.20210531.1359.020.htmL>.]

[7] XIAO J S, XIE B J, CAO Y P, et al. Characterization of oligomeric procyanidins and identification of quercetin glucuronide from lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) seedpod[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2012, 60(11): 2825.

[8] 郑妍,张馨匀,隋勇.莲原花青素对面包品质及功能特性的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(8): 62-68. [ZHENG Yan, ZHANG Xinyun, SUI Yong. Effects of lotus proanthocyanidins on bread quality and functional characteristics[J]. *Food Science*, 2020, 41(8): 62-68.]

[9] LI X, SUI Y, WU Q, et al. Attenuated mTOR signaling and enhanced glucose homeostasis by dietary supplementation with lotus seedpod oligomeric procyanidins in streptozotocin (STZ)-induced diabetic mice[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2017: acs.jafc.7b00233.

[10] DUAN Y, ZHANG H, XU F, et al. Inhibition effect of procyanidins from lotus seedpod on mouse B16 melanoma *in vivo* and *in vitro*[J]. *Food Chemistry*, 2010, 122(1): 84-91.

[11] 陈梦雨,黄小丹,王钊,等.植物 LSPC 的研究进展及其应用现状[J]. *中国食物与营养*, 2018, 24(3): 54-58. [CHEN Mengyu, HUANG Xiaodan, WANG Zhao, et al. Research progress and application status of plant LSPC[J]. *China Food and Nutrition*, 2018, 24(3): 54-58.]

[12] 方欢乐,于晋茹,陶炎炎,等.葡萄籽 LSPC 抗衰老作用的研究[J]. *食品与药品*, 2020, 22(6): 448-452. [FANG huanle, YU Jinru, TAO Yanyan, et al. Study on the anti-aging effect of grape seed LSPC[J]. *Food and Drug*, 2020, 22(6): 448-452.]

[13] 王满生,王发祥,杨晶,等.莲房原花青素提取方法、生理功能及其在食品工业中应用的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(5): 349-356. [WANG Mansheng, WANG Faxiang, YANG Jing, et al. Research progress on extraction methods, physiological functions and application in food industry of Proanthocyanidins from lotus seeds[J]. *Food Industry Science and Technology*, 2021, 42(5): 349-356.]

[14] WU Q, LI S, LI X, et al. Inhibition of advanced glycation endproduct formation by lotus seedpod oligomeric procyanidins through RAGE-MAPK Signaling and NF- κ B activation in high-fat-diet rats[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2015: 6989.

[15] 杨军,汪丽,周航.减脂功能性华夫饼的工艺研究[J]. *现代食品*, 2020(22): 95-99. [YANG Jun, WANG Li, ZHOU Hang. Study on the technology of fat reducing functional waffles[J]. *Modern Food*, 2020(22): 95-99.]

[16] ZHANG X, FENG C, WANG M. Antioxidant and anti-glycation activity of selected dietary polyphenols in cookie model[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2014, 62(7): 1643-1648.

[17] GENGU N, CHEN G J, RONALD, et al. Cereal bran extracts inhibit the formation of advanced glycation endproducts in a bovine serum albumin/glucose model[J]. *Cereal Chemistry*, 2018.

[18] SUN X, TANG J, WANG J, et al. Formation of advanced glycation endproducts in ground beef under pasteurisation conditions[J]. *Food Chemistry*, 2015, 172(apr.1): 802-807.

[19] LI X C, HU Q P, JIANG S J, et al. Flos chrysanthemi indicis protects against hydroxyl-induced damages to DNA and MSCs via

- antioxidant mechanism[J]. *Journal of Saudi Chemical Society*, 2015, 19(4): 454–460.
- [20] SING H, MURTHY K C, JAYAPRAKASHA G K. Studies on the antioxidant activity of pomegranate (*Punica granatum*) peel and seed extracts using *in vitro* models[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2002, 50(1): 81–6.
- [21] THAIPONG K, BOONPRAKOB U, CROSBY K, et al. Comparison of ABTS, DPPH, FRAP, and ORAC assays for estimating antioxidant activity from guava fruit extracts[J]. *Journal of Food Composition & Analysis*, 2012, 19(6-7): 669–675.
- [22] ERDONGAN-ORHAN I, SEVER-YILMAZ B, ALYUN M L, et al. Radical quenching activity, ferric-reducing antioxidant power, and ferrous ion-chelating capacity of 16 *Ballota* species and their total phenol and flavonoid contents[J]. *Journal of Medicinal Food*, 2010, 13(6): 1537–1543.
- [23] LI X. Solvent effects and improvements in the deoxyribose degradation assay for hydroxyl radical-scavenging[J]. *Food Chemistry*, 2013, 141(3): 2083–2088.
- [24] CAO M, CAO A, WANG J, et al. Effect of magnetic nanoparticles plus microwave or far-infrared thawing on protein conformation changes and moisture migration of red seabream (*Pagrus Major*) fillets[J]. *Food Chemistry*, 2018, 266(15): 498–507.
- [25] 王丽莎, 唐雪燕, 焦婷婷. 葡萄籽提取物 LSPC 在蛋糕及面包中的应用研究[J]. *现代食品*, 2020(13): 72–74, 78. [WANG Lisha, TANG Xueyan, JIAO Tingting. Application of grape seed extract LSPC in cake and bread[J]. *Modern Food*, 2020(13): 72–74, 78.]
- [26] 谷满屯, 盛占武, 商文婷, 等. 没食子酸对高蛋白中间水分食品品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(3): 79–82, 87. [GU Mantun, SHENG Zhanwu, SHANG Wenting, et al. Effect of gallic acid on the quality of high protein intermediate moisture food[J]. *Food Industry Science and Technology*, 2016, 37(3): 79–82, 87.]
- [27] 贾洪锋, 钟志惠, 孙俊秀, 等. 不同加工方式对绿壳鸡蛋和普通鸡蛋海绵蛋糕品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(13): 172–176, 180. [JIA Hongfeng, ZHONG Zhihui, SUN Junxiu, et al. Effects of different processing methods on the quality of green shell egg and ordinary egg sponge cake[J]. *Food Industry Science and Technology*, 2017, 38(13): 172–176, 180.]
- [28] LU X, LEE J, GONG Z, et al. HS-SPME GC/MS characterization of volatiles in raw and dry-roasted almonds (*Prunus dulcis*)[J]. *Food Chemistry*, 2014, 151(may 15): 31–39.
- [29] 徐正华, 梁玉葵, 朱克卫, 等. 食品中晚期糖基化中间产物及终末产物研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(5): 158–163. [XYU Zhenghua, LIANG Yushen, ZHU Kewei, et al. Research progress of intermediate and end products of food glycosylation[J]. *Journal of Food Safety and Quality Inspection*, 2020, 11(5): 158–163.]
- [30] NIWA T. Dialysis-related amyloidosis: Pathogenesis focusing on AGE modification[J]. *Seminars in Dialysis*, 2010, 14(2): 123–126.
- [31] 俞腾飞, 裴允彤, 张傑. 纤维素酶-超声波辅助法提取葡萄籽 LSPC 的工艺研究[J]. *农产品加工*, 2018(1): 18–21, 27. [YU Tengfei, PEI Yuntong, ZHANG Jie. Study on extraction of LSPC from grape seeds by cellulase ultrasonic assisted method[J]. *Agricultural Products Processing*, 2018(1): 18–21, 27.]
- [32] 汪志慧, 孙智达, 谢笔钧. 莲房原花青素的稳定性及热降解动力学研究[J]. *食品科学*, 2011, 32(7): 77–82. [WANG Zhihui, SUN Zhida, XIE Bijun. Study on the stability and thermal degradation kinetics of proanthocyanidins in lotus seeds[J]. *Food Science*, 2011, 32(7): 77–82.]
- [33] WU G, SHEN Y, QI Y, et al. Improvement of *in vitro* and cellular antioxidant properties of Chinese steamed bread through sorghum addition[J]. *Food Science and Technology Zurich*, 2018.
- [34] APEA-BAH F B, MINNAAR A, BESTER M J, et al. Sorghum-cowpea composite porridge as a functional food, Part II: Antioxidant properties as affected by simulated *in vitro* gastrointestinal digestion[J]. *Food Chem*, 2016, 197(Pt A): 307–315.
- [35] COELHO C, RIBEIRO M, CRUZ A, et al. Nature of Phenolic compounds in coffee melanoidins[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2014, 62(31): 7843–53.
- [36] LI W, WANG P, XU X, et al. Use of low-field nuclear magnetic resonance to characterize water properties in frozen chicken breasts thawed under high pressure[J]. *European Food Research & Technology*, 2014, 239(2): 183–188.
- [37] HANSEN C L, THYBO A K, BERTRAM H C, et al. Determination of dry matter content in potato tubers by low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR)[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58(19): 10300–10304.
- [38] 张绪坤, 祝树森, 黄俭花, 等. 用低场核磁分析胡萝卜切片干燥过程的内部水分变化[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(22): 282–287. [ZHANG Xukun, ZHU Shusen, HUANG Jianhua, et al. Analysis of internal moisture changes during carrot slice drying by low field NMR[J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2012, 28(22): 282–287.]
- [39] 宋平, 徐静, 马贺男, 等. 用低场核磁共振检测水稻浸种过程中种子水分的相态及分布特征[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(6): 204–210. [SONG Ping, XYU Jing, MA Henan, et al. Detection of phase state and distribution characteristics of seed water during rice seed soaking by low field NMR[J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2016, 32(6): 204–210.]
- [40] 刘传菊, 汤尚文, 李欢欢, 等. 基于低场核磁共振技术的红薯微波干燥水分变化研究[J]. *食品科技*, 2019, 44(8): 58–64. [LIU Chuanju, TANG Shangwen, LI Huanhuan, et al. Study on moisture change of sweet potato microwave drying based on low field NMR[J]. *Food Science and Technology*, 2019, 44(8): 58–64.]
- [41] NAVARRO M, MORALES F J. Effect of hydroxytyrosol and olive leaf extract on 1,2-dicarbonyl compounds, hydroxymethylfurfural and advanced glycation endproducts in a biscuit model[J]. *Food Chemistry*, 2017, 217: 602–609.
- [42] FU Z, YOO M, ZHOU W, et al. Effect of (-)-epigallocatechin gallate (EGCG) extracted from green tea in reducing the formation of acrylamide during the bread baking process[J]. *Food Chemistry*, 2018, 242(MAR.1): 162–168.
- [43] 张瑜, 代晨曦, 史学伟, 等. 沙枣花挥发性物质的分析及特征香气成分的鉴定[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(24): 273–280.

- [ZHANG Yu, DAI Chenxi, SHI Xuewei, et al. Analysis of volatile substances and identification of characteristic aroma components of *Elaeagnus angustifolia* flowers[J]. Food Industry Science and Technology, 2018, 39(24): 273-280.]
- [44] 张薇, 程晓燕, 黄卫宁, 等. 含天然酵母粉发酵面包的营养与老化特性及风味化合物特征[J]. 食品科学, 2014, 35(23): 33-38. [ZHANG Wei, CHENG Xiaoyan, HUANG Weining, et al. Nutritional and aging characteristics and flavor compound characteristics of fermented bread containing natural yeast powder[J]. Food Science, 2014, 35(23): 33-38.]
- [45] 罗庆, 李艳丽, 唐诗森, 等. 儿茶素对食醋总酚、色率、风味及晚期糖基化产物的影响[J]. 中国调味品, 2018, 43(9): 4-10. [LUO Qing, LI Yanli, TANG Shimiao, et al. Effects of catechins on total phenols, color rate, flavor and advanced glycation products of vinegar[J]. Chinese Condiments, 2018, 43(9): 4-10.]
- [46] 涂雅俊, 黄田苗, 赵宝, 等. 发酵葡萄干对面包烘焙特性及风味的影响[J]. 食品工业科技, 2013, 34(5): 80-84. [TU Yajun, HUANG Tianmiao, ZHAO Ba, et al. Effects of fermented raisin on baking characteristics and flavor of bread[J]. Food Industry Science and Technology, 2013, 34(5): 80-84.]