

# 西兰花无麸质海绵蛋糕制备 及其抗氧化性研究

赵冬吉

(海宁市食品农产品检验检测中心, 浙江 海宁 314400)

**摘要:** 研究添加西兰花冻干粉(broccoli lyophilized powder, BLP)后无麸质海绵蛋糕的感官品质以及抗氧化特性的影响; 抗氧化试验结果表明, 添加 BLP 能显著提高无麸质海绵蛋糕的抗氧化能力, 且本试验配方能保证烘焙加工后海绵蛋糕硫苷(glucosinolate, GLS)的稳定性, 使制备的西兰花无麸质海绵蛋糕具有较高水平的 GLS 含量; 感官评价的结果表明, 添加 3% 的 BLP 的无麸质海绵蛋糕的接受程度最高, 呈抹茶色, 具有海绵蛋糕典型的风味。该条件下的 GLS 含量为 1.34 mg/g、总酚含量为 0.77 mg/g, 对超氧阴离子自由基清除能力为 0.79  $\mu\text{mol/mL}$  Trolox、对 ABTS<sup>+</sup> 自由基清除能力为 1.04  $\mu\text{mol/mL}$  Trolox、还原能力为 2.57  $\mu\text{mol/mL}$  Trolox。

**关键词:** 西兰花; 硫代葡萄糖苷; 抗氧化性; 无麸质; 海绵蛋糕

## Preparation and Antioxidant Activities of Broccoli Gluten-free Sponge Cake

ZHAO Dong-ji

(Food and Agricultural Products Inspection and Testing Center of Haining, Haining 314400, Zhejiang, China)

**Abstract:** The sensory quality and antioxidant properties of gluten-free sponge cakes after adding broccoli lyophilized powder (BLP) were investigated. Antioxidant activities results showed that the antioxidant capacity of gluten-free sponge cakes was significantly improved by adding with BLP. The results of sensory evaluation showed that the gluten-free sponge cake with 3% BLP was highestly acceptable, which had a matcha color with the typical flavor of sponge cake. Under this condition, the GLS content and total phenol content were 1.34 mg/g and 0.77 mg/g respectively. The scavenging ability of superoxide anion radical and ABTS<sup>+</sup> free radical scavenging rate were 0.79  $\mu\text{mol/mL}$  Trolox and 1.04  $\mu\text{mol/mL}$  Trolox, respectively, and the reducing power was 2.57  $\mu\text{mol/mL}$  Trolox.

**Key words:** broccoli; glucosinolates; antioxidant activities; gluten-free; sponge cake

引文格式:

赵冬吉. 西兰花无麸质海绵蛋糕制备及其抗氧化性研究[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(5): 162-167

ZHAO Dongji. Preparation and Antioxidant Activities of Broccoli Gluten-free Sponge Cake[J]. Food Research and Development, 2019, 40(5): 162-167

近年来由谷蛋白引起的过敏和免疫反应的发病率逐渐升高<sup>[1]</sup>, 乳糜泻就是因摄入含麸质食品(主要是麦类及其制品)而诱发的自身免疫性肠病, 也称之为麸质不耐症; 研究报道乳糜泻主要发生在欧美国家,

发病率达 1%, 近年来中国乳糜泻病例报道也逐渐增大。无麸质食品是治疗麸质不耐症的唯一食品, 但无麸质食品存在口感差、营养价值低等缺陷; 通过额外添加活性功能物质可以提高无麸质食品的营养价值<sup>[2]</sup>, 而购买活性功能物质直接在生产过程使用则又大大增加了生产成本, 通过加工使用果蔬副产物作为活性功能物质来源可降低生产成本。

作者简介: 赵冬吉(1985—), 男(汉), 工程师, 本科, 研究方向: 食品农产品检测。

流行病学表明,增加如西兰花等十字花科蔬菜的摄入可降低癌症和心血管治病的风险<sup>[3]</sup>,卷心菜、菜花和西兰花等芸苔属蔬菜含有芥子硫苷,这是一组具有预防功能特性的含硫葡萄糖苷;当植物组织被粉碎或咀嚼破坏时,释放内源性酶黑芥子酶将硫苷(glucosinolate, GLS)水解成异硫氰酸酯和吲哚等生物活性物质,未水解的 GLS 不具有生物活性。萝卜硫素是研究最广泛的一种异硫氰酸酯,许多体内和体外研究均显示异硫氰酸酯和吲哚衍生物具有抗癌功能<sup>[4]</sup>。西兰花同时还富含酚类的活性物质,具有很高的抗氧化能力<sup>[5]</sup>。而目前西兰花的消费只占其生物物质的 30%,西兰花的茎、叶等副产物废弃量大,造成了严重的资源浪费和经济损失;研究表明,西兰花茎、叶等副产品也富含 GLS 和酚类物质,也具有抗氧化、抗癌等功效<sup>[6]</sup>。最新研究显示萝卜硫素在治疗肥胖症研究方面取得良好成果,未来西兰花及其加工制品将是天然、健康的减肥食品来源<sup>[7]</sup>。

以西兰花副产物拟制备富含异硫氰酸酯、多酚等生物活性物质的新型无麸质海绵蛋糕,以新型无麸质海绵蛋糕理化特性、GLS 含量、总酚含量及其抗氧化能力为分析指标,研究添加西兰花副产物粉对无麸质海绵蛋糕品质的影响。以期开发出口感佳且富含营养的新型无麸质海绵蛋糕,为西兰花的综合加工利用以提高其经济附加值提供科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料与试剂

西兰花:当地超市;甲醇、正己烷(国产分析纯);羧甲基纤维素钠(carboxymethyl cellulose sodium, CMC):武汉东康源科技有限公司;苯甲基硫代葡萄糖苷标准品与水溶性维生素 E、ABTS;Sigma-Aldrich 公司;2,4,6-三(2-吡啶基)三嗪,6-Tris(2-pyridyl)-s-triazine(TPTZ):Bio-rad 公司;Trolox 标准品:北京索莱宝科技有限公司。

HHS-11-4 恒温水浴锅:浙江托普仪器公司;Alpha-1506 型紫外可见分光光度计:上海谱元析有限公司;FA2004N 分析天平:上海精密有限公司。

### 1.2 西兰花冻干粉制备

挑选没有机械损伤的成熟西兰花叶片,洗涤并在 95℃水中热烫 1 min,钝化西兰花叶子所含的黑芥子酶和多酚氧化酶;同时移除叶柄和主要叶脉。将西兰花叶片冷冻干燥并研磨,过 60 目筛得西兰花冻干粉,将 BLP 储存在密闭容器中保存于冰箱备用。

### 1.3 无麸质海绵蛋糕制备

无麸质海绵蛋糕制备参照 Krupakozak 等<sup>[8]</sup>方法修改如下:将鸡蛋液、白砂糖、食盐倒入打蛋缸内,先用慢速搅拌 1 min 至糖全部溶化,立即加入混合过筛的土豆粉、玉米粉,慢速搅拌 0.5 min,再加入蛋糕油快速搅打 4 min(面糊色泽由浅黄色变为乳黄色,最终为乳白色,面糊体积变为原来 2.5 倍),加入清水搅拌 0.3 min,最后转为慢速搅拌并加入油脂搅拌 0.2 min,混合均匀,整个过程搅打蛋糕面糊时间为 6 min。将 BLP 按照 0.3%、6%和 9%比例代替马铃薯粉和玉米粉总量,制备西兰花-无麸质海绵迷你蛋糕。将 30 g 面团放入纸杯中并在 180℃烘烤 25 min。将烤制的西兰花-无麸质海绵蛋糕在室温下冷却 2 h 后;冷冻干燥、研磨成细粉过 60 目,并存放在密闭容器于冰箱中备用。西兰花无麸质海绵蛋糕制备 4 种工艺参数(B<sub>0</sub>、B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>、B<sub>3</sub>)见表 1。

表 1 西兰花无麸质海绵蛋糕制备工艺参数

Table 1 Preparation parameters of broccoli gluten-free sponge cake

配方	土豆粉/%	玉米粉/%	BLP/%	糖/%	盐/%	蛋/%	油/%	泡打粉/%
B <sub>0</sub>	30.5	8	0	15	0.3	42	3.5	0.7
B <sub>1</sub>	29.6	7.8	1.1	15	0.3	42	3.5	0.7
B <sub>2</sub>	28.7	7.5	2.3	15	0.3	42	3.5	0.7
B <sub>3</sub>	27.8	7.2	3.5	15	0.3	42	3.5	0.7

### 1.4 BLP 基本理化指标测定

蛋白质含量测定参照 GB 5009.5-2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》;灰分含量测定参照 GB 5009.4-2016《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》。

### 1.5 硫代葡萄糖苷含量的测定

#### 1.5.1 硫代葡萄糖苷标准曲线测定

硫代葡萄糖苷含量的测定参照张涛等<sup>[9]</sup>方法测定,具体修改方法如下:称取苯甲基硫代葡萄糖苷标准品 0.071 0 g 用去离子水溶解后定容于 50 mL 容量瓶中配成 3.17 μmol/L 标准液。精密量取 2.5、5.0、7.5、10、12.5 mL 标准液于 25 mL 容量瓶中依次加入 0.1% CMC 3.0 mL、4.0 mmol/L 氯化钾 2 mL 后加去离子水定容,在室温反应 1 h 后,于 520 nm 处测定吸光值,得到标准曲线方程为: $A=0.04236C+0.0304$ ( $R^2=0.9987$ )。

#### 1.5.2 西兰花无麸质海绵蛋糕硫代葡萄糖苷含量测定

准确称取 10.00 g 样品于 250 mL 三角瓶中加入 95%乙醇 100 mL 于 200 r/min 条件下浸提 1 h,在 4 000 r/min 条件下离心 15 min,取上清液。取 2.0 mL 上清液于试管中加入 0.1% CMC 3.0 mL、4.0 mmol/L 氯

化钼 2 mL, 在室温反应 1 h, 对照组以相应试剂做空白, 于 520 nm 处测定吸光值, 按 1.5.1 标准曲线计算 GLS 含量。

### 1.6 总酚含量测定

西兰花无麸质海绵蛋糕总酚含量采用福林酚法参照 Horszald 等<sup>[10]</sup>修订如下: 称取样品粉末和 BLP 各 10.00 g 于 250 mL 三角瓶中, 加入 60% 乙醇溶液 50 mL, 在 200 r/min 条件下振荡 30 min, 于 4 000 r/min 条件下离心 15 min, 沉淀按上述条件再提取一次, 合并两次滤液为样品液。取 15  $\mu$ L 样品液于微孔板中并加入 250  $\mu$ L 福林酚试剂(用水按体积比 1:15 稀释), 混合后在黑暗处反应 10 min; 然后加入 25  $\mu$ L 20% 碳酸钠溶液, 混合后反应 20 min, 于 755 nm 处用酶标仪测定吸光值。以没食子酸(0.03 mg/L~1.0 mg/L)制作标准曲线, 结果表示为 mg/g。

### 1.7 西兰花无麸质海绵蛋糕抗氧化能力测定

#### 1.7.1 ABTS<sup>+</sup>自由基测定

ABTS<sup>+</sup>自由基清除活性测定根据 Biegańskamare-cik 等<sup>[11]</sup>方法测定修改如下: 将 0.007 mol/L ABTS 溶液与 0.002 mol/L 过硫酸钾溶液以 1:0.5 的比例混合在室温下在避光放置 12 h~16 h。测定前, 将 ABTS 溶液用 pH7.4 的磷酸盐缓冲液(phosphate buffer solution, PBS)稀释直到 ABTS 溶液达到 0.700( $\pm$ 0.020)的吸光度。将 1.6 提取上清液(50  $\mu$ L)与 5 mL 稀释的 ABTS 溶液混合, 37  $^{\circ}$ C 下反应 5 min 后在 734 nm 测定其吸光度  $A_{734}$ , 以 PBS 缓冲液用作空白。平行测定 3 次, 根据以下公式算 ABTS<sup>+</sup>自由基的清除率, 结果用  $\mu$ mol/mL Trolox 相对值表示。

#### 1.7.2 还原能力测定

现配铁还原能力(ferric reduction ability power, FRAP)溶液: 0.3 mol/L pH 3.6 醋酸盐缓冲液、10 mmol/L 溶于 40 mmol/L HCl 的 TPTZ 溶液和 20 mmol/L FeCl<sub>3</sub> 以 10:1:1 体积比混合。取 1.6 样品液 5  $\mu$ L 中加入 245  $\mu$ L FRAP 溶液, 于室温反应 10 min 后, 在 593 nm

处测定样品和标准对照 Trolox 还原 Fe<sup>3+</sup>的能力, 结果用 mmol/mL Trolox 相对值表示<sup>[12]</sup>。

#### 1.7.3 超氧阴离子自由基(O<sub>2</sub><sup>-</sup>)清除能力测定

西兰花无麸质海绵蛋糕的 O<sub>2</sub><sup>-</sup>清除能力参考姜宁等<sup>[13]</sup>采用邻苯三酚氧化法测定, 以 Trolox 为标准品, 以 Trolox 浓度为 0.3 mmol/L~10 mmol/L 制作标准曲线, 测定西兰花无麸质海绵蛋糕的 O<sub>2</sub><sup>-</sup>清除能力, 结果用  $\mu$ mol/mL Trolox 相对值表示。

### 1.8 感官评价

随机挑选 10 名品尝志愿者根据 GB/T 14612-2008《粮油检验 小麦粉面包烘焙品质试验 中种发酵法》对西兰花无麸质海绵蛋糕颜色、香气、味道以及质地进行感官评价, 结果表示为 10 名品尝志愿者分数的平均值。西兰花无麸质海绵蛋糕感官评价指标见表 2。

表 2 西兰花无麸质海绵蛋糕感官评价指标

Table 2 Sensory evaluation index of broccoli gluten-free sponge cake

指标	不喜欢 1分~4分	中性 5分	喜欢 6分~9分
色泽	深绿色	浅绿色	抹茶绿
香气	西蓝花气味浓重	西兰花气息明显但可接受	淡淡西兰花气味
口感	松软发干、粗糙、粘牙	绵软、略有坚韧感	味纯正、细腻稍有潮湿感
组织	切面有明显大气孔、局部过硬掉渣	切面气孔不均匀、局部过硬	柔软适度、触感好有弹性

## 2 结果与分析

### 2.1 西兰花冻干粉(broccoli lyophilized powder, BLP)基本指标分析

理化分析表明西兰花蛋白含量较高为(20.87 $\pm$ 0.50)%, 灰分含量为(10.35 $\pm$ 0.27)%; 活性成分 GLS 和总酚含量分别为(4.76 $\pm$ 0.32)、9.45 mg/g。由表 2 可知, 其具有较高的 ABTS<sup>+</sup>自由基清除能力, 这归结于其含有较多的总酚, 西兰花的还原能力较弱。BLP 基本理化指标见表 3。

表 3 为西兰花冻干粉基本理化指标

Table 3 The basic physical and chemical indicators of broccoli lyophilized powder (BLP)

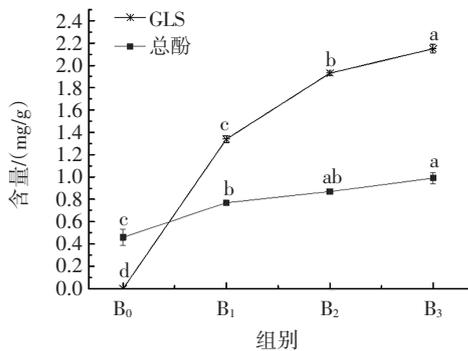
指标	GLS/(mg/g)	总酚/(mg/g)	ABTS <sup>+</sup> 自由基清除率/( $\mu$ mol/mL Trolox)	FRAP/( $\mu$ mol/mL Trolox)	O <sub>2</sub> <sup>-</sup> 清除率/( $\mu$ mol/mL Trolox)
含量	4.76 $\pm$ 0.32	9.45 $\pm$ 0.13	99.83 $\pm$ 8.09	38.07 $\pm$ 3.11	60.89 $\pm$ 5.38

### 2.2 添加 BLP 无麸质海绵蛋糕 GBL 和总酚含量

BLP 添加量对无麸质海绵蛋糕 GBL 和总酚含量的影响见图 1。

由图 1 可知随着 BLP 含量的增加 GLS 含量成比

例增加, 统计分析显示 GLS 含量与 BLP 含量之间存在正相关( $r=0.90$ ), 且 B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>、B<sub>3</sub> 3 组 GLS 含量增加具有统计学意义( $p<0.05$ )。同样, TPC 含量的增加与 BLP 添加量成正相关( $r=0.92$ ), 与对照组 B<sub>0</sub> 相比, 添加 BLP



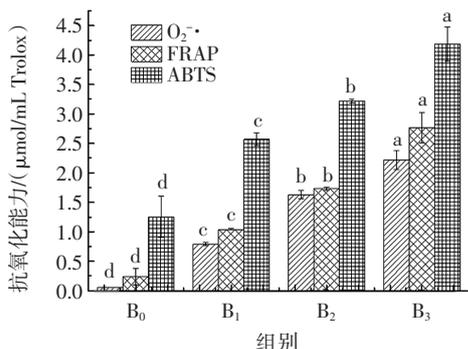
不同小写字母表示差异水平显著,  $p < 0.05$ 。

图1 BLP添加量对无麸质海绵蛋糕GLS和总酚含量的影响  
Fig.1 Effect of BLP addition on GLS and total phenolic content of gluten-free sponge cake

的无麸质海绵蛋糕 TPC 含量显著增加 ( $p < 0.05$ ),  $B_1$  组增加了 67%, 在  $B_3$  中 TPC 含量已接近 1 mg/g; 但随着 BLP 含量的增加, TPC 含量没有显著增加 ( $p > 0.05$ )。

### 2.3 添加 BLP 无麸质海绵蛋糕抗氧化能力

BLP 添加量对无麸质海绵蛋糕抗氧化能力影响见图 2。



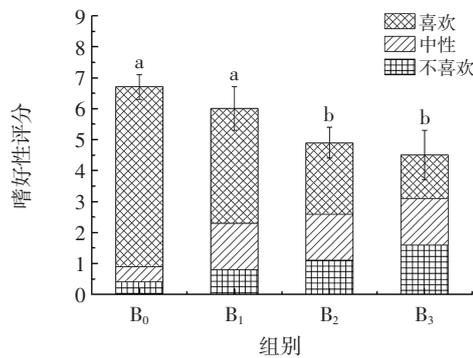
不同小写字母表示差异水平显著,  $p < 0.05$ 。

图2 BLP添加量对无麸质海绵蛋糕抗氧化能力影响  
Fig.2 Effect of BLP addition on antioxidant capacity of gluten-free sponge cake

由图 2 可知, 与对照组相比, 所有添加 BLP 的组别  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$  的抗氧化能力显著提高 ( $p < 0.05$ ), 而且  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$  的抗氧化能力与 BLP 添加量呈正相关 ( $r_{ABTS} = 0.98$ ,  $r_{FRAP} = 0.99$ ,  $r_{O_2\cdot^-} = 0.96$ ), 抗氧化能力随着 GLS 和总酚含量的增大显著提高 ( $p < 0.05$ ); 添加 9% BLP 后其对  $ABTS^+$  自由基清除能力比对照组提升了 2.4 倍, 对 FRAP 的还原能力提升了 10.5 倍, 对  $O_2\cdot^-$  清除能力提升了 36 倍; 由此可知, 添加 BLP 能显著的提高无麸质海绵蛋白抗氧化能力。

### 2.4 添加 BLP 无麸质海绵蛋糕的感官评价

添加 BLP 对无麸质海绵蛋糕的感官评价的影响见图 3。



不同小写字母表示差异水平显著,  $p < 0.05$ 。

图3 添加 BLP 对无麸质海绵蛋糕的感官评价的影响  
Fig.3 Effect of adding BLP on sensory evaluation of gluten-free sponge cake

如图 3 所示, 对照组无麸质海绵蛋糕整体感官质量显著高于试验组 ( $p < 0.05$ ), 据 10 名品尝志愿者反馈信息可知, 对照组无麸质海绵蛋糕具有典型的海绵蛋糕特征金黄色, 试验组海绵蛋糕特征颜色为绿色, 且随着 BLP 含量的增加色泽加深, 同时伴随着 GLS 含量的增大, 西兰花特征气息明显增大, 消费者接受程度显著下降; 添加 6% 和 9% BLP 的海绵蛋糕消费者接受程度为 49% 和 45%。基于消费者偏好分布, 选择 BLP 添加量为 3%, 接受程度为 60%, 与空白对照组差 10%, 二者最近接;  $B_1$  试验组的西兰花无麸质海绵蛋糕色泽为抹茶绿、具有海绵蛋糕典型的风味外还有淡淡的西兰花特殊气息, 口感细腻, 稍有潮湿感, 柔软适度、触感好且有弹性。

### 3 讨论

国内外对水果和蔬菜加工过程产生的副产物均进行了大量的研究以提升其附加值<sup>[14-15]</sup>, 果蔬副产品是膳食纤维和天然活性功能物质的重要来源。国内对西兰花副产物功效特别是抗氧化特性进行了大量研究, 研究结果显示西兰花茎和叶含有较高水平的总酚, 表现出良好的抗氧化和抗癌特性<sup>[5-6, 16-17]</sup>。最近有研究西兰花叶子提取物作为饮料中功能活性物质的来源, 如 Dziki D 等<sup>[18]</sup>研发的含有西兰花浓缩物的绿茶饮料, 其中硫苷含量最高能达到 7.5 mg/g, 其显著特征是总酚含量较高, 最高达到 688 mg/100 mL, 对 DPPH 自由基的清除能力高于 100  $\mu\text{mol/mL Trolox}$ 。而西兰花很少添加到食品中, 据国内研究数据显示, 西兰花作为功效成分尚未在烘焙产品中使用。

本研究中使用的 BLP 的显著特征是蛋白质含量较高, 西兰花的营养成分一方面取决于品种和生长条件。在本试验中对 BLP 冷冻干燥预处理, 处理方式也

可能对其营养特性产生影响。另一特点是 BLP 总酚含量较高,这与 Reis<sup>[19]</sup>、Martinez 等<sup>[20]</sup>学者鉴定花椰菜中酚类化合物含量在 5.38 mg/g~13.10 mg/g 结论是一致的。总酚等生物活性化合物的存在有助于提高 BLP 的抗氧化能力。在本研究中添加 BLP 后的海绵蛋糕对 O<sub>2</sub>·清除能力极显著增大,提升了 36 倍。

烘焙加工后食品中生物活性化合物的稳定性以及作为功能成分的有效性是本试验关注的焦点,在本试验中西兰花无麸质海绵蛋糕 GLS 含量并不是随着西兰花添加量的增加成线性增加,如 B<sub>2</sub> 与 B<sub>1</sub> 相比 GLS 增加了 0.44 倍,而 B<sub>3</sub> 与 B<sub>1</sub> 相比则增加了 0.11 倍;Ciska 等<sup>[21]</sup>报道了煮熟的布鲁塞尔豆芽中 GLS 含量降解出现类似的趋势。上述现象可归结于热处理过程中植物组织的降解、且 GLS 与细胞壁结合部分被释放,同时还存在食物体系生物活性化合物之间存在协同相互作用。如 Xu 等<sup>[22]</sup>报道了蔗糖和 GLS 之间的相互作用。在西兰花中添加蔗糖可抑制了 GLS 在储存期间的降解。Giambanelli 等<sup>[23]</sup>还报道了马铃薯淀粉与玉米淀粉达到一定比例可对 GLS 产生保护作用,如西兰花冻干粉与玉米/马铃薯淀粉的比例为 1:9 时,GLS 的热降解受到抑制。在本试验中,海绵蛋糕配方中蔗糖占 15%,且马铃薯淀粉/玉米粉与西兰花冻干粉比例超过 1:9,因此,蔗糖、马铃薯淀粉/玉米粉和西兰花生物活性化合物之间的存在相互作用,从而一定程度上保证了烘焙加工后食品中生物活性化合物的稳定性和有效性。

高 GLS 含量的食物对健康有益,GLS 降解过程中产生的异硫氰酸酯,这是芸苔属蔬菜的抗癌作用关键物质<sup>[24]</sup>。即使水解 GLS 的黑芥子酶在烘焙期间失活,肠道菌群也能降解 GLS 并释放异硫氰酸酯。

#### 4 结论

本试验结果表明,添加 BLP 显著提高了无麸质海绵蛋糕的抗氧化能力,经试验,本试验配方一定程度上能保证烘焙加工后海绵蛋糕 GLS 的稳定性,使制备的西兰花无麸质海绵蛋糕具有较高水平的 GLS 含量。感官评价的结果表明,添加 3% 的 BLP 的无麸质海绵蛋糕的接受程度为 90%,呈抹茶色,具有海绵蛋糕典型的风味外还有淡淡的西兰花特殊气息,口感细腻,稍有潮湿感,柔软适度、触感好且有弹性。此时的 GLS 含量为 1.34 mg/g、总酚含量为 0.77 mg/g,对超氧阴离子自由基清除能力为 0.79 μmol/mL Trolox、对 ABTS+ 自由基清除能力为 1.04 μmol/mL Trolox、还原能力为 2.57 μmol/mL Trolox。

#### 参考文献:

- [1] Sicherer S H, Sampson H A. Food allergy: Epidemiology, pathogenesis, diagnosis, and treatment[J]. Journal of Allergy & Clinical Immunology, 2014, 133(2): 291-307
- [2] Drabińska N, Zieliński H, Krupa-Kozak U. Technological benefits of inulin-type fructans application in gluten-free products[J]. Trends in Food Science & Technology, 2016, 56: 149-157
- [3] Zhang X, Shu X O, Xiang Y B, et al. Cruciferous vegetable consumption is associated with a reduced risk of total and cardiovascular disease mortality[J]. American Journal of Clinical Nutrition, 2011, 94(1): 240-246
- [4] Angelino D, Jeffery E. Glucosinolate hydrolysis and bioavailability of resulting isothiocyanates: Focus on glucoraphanin[J]. Journal of Functional Foods, 2014, 7(2): 67-76
- [5] Raúl D P, Maria Carmen M B, Micaela C, et al. Broccoli-derived by-products—a promising source of bioactive ingredients[J]. Journal of Food Science, 2010, 75(4): 383-92
- [6] Hwang J H, Lim S B. Antioxidant and anticancer activities of broccoli by-products from different cultivars and maturity stages at harvest[J]. Preventive Nutrition & Food Science, 2015, 20(1): 8-14
- [7] Martins T, Colaço B, Venâncio C, et al. Potential effects of sulforaphane to fight obesity[J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2018, 98: 2837-2844
- [8] Krupakozak U, Altamiranofortoul R, Wronkowska M, et al. Bread-making performance and technological characteristic of gluten-free bread with inulin supplemented with calcium salts[J]. European Food Research & Technology, 2012, 235(3): 545-554
- [9] 张涛, 安熙强, 刘君琳, 等. 维药恰玛古硫代葡萄糖苷的提取纯化工艺及其抗肿瘤作用[J]. 中成药, 2016, 38(8): 1831-1835
- [10] Horszwald A, Andlauer W. Characterisation of bioactive compounds in berry juices by traditional photometric and modern microplate methods[J]. Journal of Berry Research, 2011, 1(4): 189-199
- [11] Biegańskamarecik R, Radziejewskakubzdela E, Marecik R. Characterization of phenolics, glucosinolates and antioxidant activity of beverages based on apple juice with addition of frozen and freeze-dried curly kale leaves (*Brassica oleracea* L. var. *acephala* L.)[J]. Food Chemistry, 2017, 230: 271
- [12] Belwal T, Dhyan P, Bhatt I D, et al. Optimization extraction conditions for improving phenolic content and antioxidant activity in *Berberis asiatica*, fruits using response surface methodology (RSM)[J]. Food Chemistry, 2016, 207: 115-124
- [13] 姜宁, 刘晓鹏, 陈芳, 等. 厚朴多糖提取工艺及其体外抗氧化活性[J]. 食品科学, 2015, 36(6): 12-17
- [14] P Gupta, J Ray, BK Aggarwal, et al. Food Processing Residue Analysis and its Functional Components as Related to Human Health: Recent Developments[J]. Austin Journal of Nutrition and Food Sciences, 2015, 3(3): 1068-1074
- [15] 杨文晶, 许泰百, 冯叙桥, 等. 果蔬加工副产物的利用现状及发展趋势研究进展[J]. 食品工业科技, 2015, 36(14): 379-383
- [16] 袁定帅. 西兰花加工过程中营养品质及抗氧化特性研究[D]. 郑

- 州:河南工业大学, 2017
- [17] 袁定帅, 陈洁, 赖晓芳, 等. 热加工对西兰花营养品质及抗氧化性的影响[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2016, 37(5): 91-95
- [18] Dżiki D, Różyło R, Gawlik-Dżiki U, et al. Current trends in the enhancement of antioxidant activity of wheat bread by the addition of plant materials rich in phenolic compounds[J]. Trends in Food Science & Technology, 2014, 40(1): 48-61
- [19] Reis L C R D, Oliveira V R D, Hagen M E K, et al. Carotenoids, flavonoids, chlorophylls, phenolic compounds and antioxidant activity in fresh and cooked broccoli (*Brassica oleracea*, var. Avenger) and cauliflower (*Brassica oleracea*, var. Alphina F1)[J]. LWT—Food Science and Technology, 2015, 63(1): 177-183
- [20] Martínez-Villaluenga C, Peñas E, Ciska E, et al. Time dependence of bioactive compounds and antioxidant capacity during germination of different cultivars of broccoli and radish seeds[J]. Food Chemistry, 2010, 120(3): 710-716
- [21] Ciska E, Narwojsz A, Honke J, et al. Boiled Brussels sprouts: A rich source of glucosinolates and the corresponding nitriles[J]. Journal of Functional Foods, 2015, 19(Part A): 91-99
- [22] Xu F, Tang Y, Dong S, et al. Reducing yellowing and enhancing antioxidant capacity of broccoli in storage by sucrose treatment[J]. Postharvest Biology & Technology, 2016, 112: 39-45
- [23] Giambanelli E, Verkerk R, Fogliano V, et al. Broccoli glucosinolate degradation is reduced performing thermal treatment in binary systems with other food ingredients[J]. Rsc Advances, 2015, 5(82): 66894-66900
- [24] Angelino D, Jeffery E. Glucosinolate hydrolysis and bioavailability of resulting isothiocyanates: Focus on glucoraphanin[J]. Journal of Functional Foods, 2014, 7(2): 67-76

收稿日期: 2018-08-07



《食品研究与开发》  
FOOD RESEARCH AND DEVELOPMENT  
企业拓展市场、提升影响力的首选媒体