

褐藻多酚对晚期糖基化终产物的抑制作用研究

张宇臣, 魏 福, 朱 莹, 傅振坤, 王娅浪, 袁高峰, 孙海燕*

(浙江海洋大学食品与药学学院, 舟山 316022)

摘 要: 目的 研究褐藻多酚对晚期糖基化终产物(advanced glycation end products, AGEs)生成的抑制作用及其机制。**方法** 建立牛血清蛋白与葡萄糖体外模拟体系及食品热加工鱼肉肠模型, 以不同浓度褐藻多酚为抑制剂, 研究其对 AGEs 生成的抑制作用; 通过分析模拟体系中赖氨酸和葡萄糖含量、蛋白质巯基水平及葡萄糖与牛血清蛋白的交联作用, 阐明褐藻多酚对 AGEs 生成抑制作用机制。**结果** 褐藻多酚对荧光性 AGEs 具有显著的抑制作用, 100 $\mu\text{g/g}$ 褐藻多酚反应 36 h, 对模拟体系 AGEs 生成抑制率达 30.33%, 50 $\mu\text{g/mL}$ 褐藻多酚对鱼肉肠 AGEs 生成抑制率达 41.91%。褐藻多酚处理后, 模拟体系中赖氨酸和葡萄糖含量、蛋白质巯基水平显著高于对照组($P<0.05$), 而葡萄糖与牛血清蛋白交联条带量显著低于对照组($P<0.05$)。**结论** 褐藻多酚可能通过与赖氨酸残基反应、保护蛋白质巯基或抑制葡萄糖与牛血清蛋白交联作用等抑制 AGEs 生成。

关键词: 晚期糖基化终产物; 褐藻多酚; 抑制作用; 鱼肉肠

Study on the inhibitory effects of brown algae polyphenols on advanced glycation end products

ZHANG Yu-Chen, WEI Fu, ZHU Ying, FU Zhen-Kun, WANG Ya-Lang,
YUAN Gao-Feng, SUN Hai-Yan*

(College of Food and Pharmacy, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China)

ABSTRACT: Objective To study the inhibitory effects of brown algae polyphenols on the formation of advanced glycation end products (AGEs) and its mechanism. **Methods** The *in vitro* simulation system of bovine serum protein and glucose and the model of food hot processed fish intestine were established. The inhibitory effect of different concentrations of brown algae polyphenols on the formation of AGEs was studied. By analyzing the content of lysine and glucose, the level of protein sulfhydryl group and the cross-linking effect of glucose and bovine serum protein in the simulated system, the inhibitory mechanism of brown algae polyphenols on the formation of AGEs was clarified. **Results** Brown algae polyphenols had a significant inhibitory effect on fluorescent AGEs, 100 $\mu\text{g/g}$ brown algae polyphenols reacted for 36 hours, and the inhibition rate of AGEs formation in the simulated system was 30.33%, when the concentration of brown algae polyphenols was 50 $\mu\text{g/g}$, the inhibition rate of AGEs in fish sausage was 41.91%. After treatment with brown algae polyphenol, the content of lysine, glucose and protein sulfhydryl in the simulated system was significantly higher than those in the control group ($P<0.05$), whereas the amount of crosslinking bands between BSA and glucose was significantly lower than that in the control group ($P<0.05$).

基金项目: 国家大学生创新性实验计划项目(201910340014)

Fund: Supported by the National University Student Innovation Program (201910340014)

*通信作者: 孙海燕, 高级实验师, 主要研究方向为食品营养与安全。E-mail: sunhy@zjou.edu.cn

*Corresponding author: SUN Hai-Yan, Senior Experimentalist, College of Food and Pharmacy, Zhejiang Ocean University, No.1 Haidanan Road, Lincheng District, Zhoushan 316022, China. E-mail: sunhy@zjou.edu.cn

Conclusion Brown algae polyphenols may inhibit the formation of AGEs by reacting with lysine residues, protecting protein sulfhydryl or inhibiting the cross-linking between glucose and bovine serum protein.

KEY WORDS: advanced glycation end products; brown algae polyphenol; inhibition; fish sausage

0 引言

晚期糖基化终产物(advanced glycation end products, AGEs)为蛋白质或脂质分子与糖结合发生蛋白质糖基化时所产生的,具有多种独特的生理生化特性,如存在特殊的荧光及交联特性等。目前已发现有近 40 种 AGEs,其中较为常见的有羧甲基赖氨酸、吡咯素和戊糖素等^[1]。研究表明人体组织或循环系统中 AGEs 积累与冠状动脉炎症、心肌损伤、糖尿病及其并发症的发生密切相关^[2-4],食源性 AGEs 已成为影响人类健康的一个慢性风险因素^[5]。近年来,如何抑制 AGEs 的生成成为研究的热点问题,已有研究发现氨基胍等人工合成抑制剂在体内可显著减少蛋白质的糖基化从而降低 AGEs 形成^[1],但人工合成抑制剂可能对机体产生不良反应,因此探索对 AGEs 产生具有抑制活性的天然产物逐渐引起人们重视,研究已发现多酚黄酮类物质如槲皮素、茶多酚、木犀草素、葛根素等对 AGEs 具有显著的抑制作用^[6-8]。

褐藻多酚普遍蕴藏于褐藻中,以间苯三酚为基本的结构单元,可系统地分为多羟基联苯(fucols)、多羟基苯醚(phlorethols)、混合多羟基联苯多苯醚(fucophlorethols)、多(间、邻)羟基苯醚(fuhalols)、二苯杂二氧和二苯呋喃(eckols)以及其他的卤代、硫酸酯化、烷基化多酚等 6 类^[9]。褐藻多酚具有抗心血管疾病、抗细菌、抗病毒、抗肿瘤和抗氧化等广泛的生物活性^[10-11],但鲜见褐藻多酚对 AGEs 生成作用的研究报道。本研究拟建立牛血清蛋白-葡萄糖(bovine serum protein-glucose, BSA-Glucose)模拟体系及食品热加工鱼肉肠体系,以不同浓度褐藻多酚为抑制剂,研究褐藻多酚对 AGEs 生成的抑制作用及其机制,以期降低食品中 AGEs 含量从而保障食品安全提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

褐藻多酚(纯度 80%,湖北顺实生物科技有限公司);牛血清蛋白(纯度 98%)、赖氨酸(纯度 98%)、二硫代二硝基苯甲酸、叠氮化钠、考马斯亮蓝 G-250、茚三酮、碳酸钠、磷酸、磷酸氢二钠、十二烷基硫酸钠、L-半胱氨酸(分析纯,国药集团化学试剂有限公司);丙烯酰胺凝胶快速制备试剂盒(批次号 P0012AC,上海生工生物工程有限公司)。

1.2 仪器与设备

F96pro 荧光分光光度计(上海棱光技术有限公司);伯乐 Bio-Rad 小型垂直电泳槽(美国伯乐公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 牛血清蛋白-葡萄糖体外模拟体系的构建

参照夏其乐等^[12]的方法并进行适当改动。以 pH 为 7.2 的 0.2 mol/L 磷酸盐缓冲液配制 10 mg/mL 的牛血清蛋白溶液和 300 mmol/L 葡萄糖溶液,分别取 2 种溶液各 6 mL 混合后添加 0.02%叠氮化钠。以 25、50、75、100 μg/mL 质量浓度梯度的褐藻多酚设置实验组,对照组不添加褐藻多酚。在 70 °C 的恒温条件下分别反应 12、24、36、48 h。

1.3.2 鱼肉肠的制备

猪肉以清水清洗、切成肉末,鲑鱼去内脏后清水冲洗并取肉、切成鱼肉泥,两者以 1:1 (m:m)比例混合,每 600 g 混合物依次加入 25 g 玉米淀粉、8 g 盐、5 g 糖、1 g 五香粉、70 g 水、20 g 玉米油后搅拌均匀并平分为 5 份,分别加入含量为 0、25、50、75、100 μg/g 褐藻多酚,继续搅拌 30 min,静置 1 h 后灌入肠衣,250 °C 烤制 0.5 h。

1.3.3 模拟体系中荧光性 AGEs 测定

荧光性 AGEs 以荧光分光光度计测定,激发波长为 350 nm、发射波长为 450 nm,荧光性 AGEs 含量以荧光强度 AU 表示。褐藻多酚对荧光性 AGEs 形成抑制率以公式(1)计算:

$$\text{抑制率}/\% = \frac{A_0 - A_1}{A_1} \times 100\% \quad (1)$$

公式中, A_0 为对照组的荧光强度, A_1 为实验组的荧光强度。

1.3.4 鱼肉肠体系中荧光性 AGEs 的测定

将 5 种含不同含量褐藻多酚的香肠冷冻干燥 24 h,研磨为冻干粉,将 100 mg 冻干粉放入 50 mL 磷酸盐缓冲液(50 mmol/L、pH 7.4)中并在 37 °C 放置 1 h 得到鱼肉肠浸出液,采用 1.3.3 方法测定鱼肉肠浸出液的荧光强度。

1.3.5 模拟体系反应后赖氨酸含量测定

参考吴凤山^[13]方法并进行适当改动,取 0.5 mL 1.3.1 中反应 12、24、36、48 h 样品依次加入 0.5 mL 4%碳酸钠溶液和 2 mL 茚三酮试剂,混匀后 80 °C 水浴 30 min,待其冷却至室温后加入 3 mL 60%乙醇,混匀后 530 nm 波长下测定吸光度值,按照式(2)计算模拟体系中赖氨酸含量:

$$\text{赖氨酸含量}/(\mu\text{g/mL}) = \frac{m_1}{V} \times n \times 1.1515 \quad (2)$$

式中: m_1 为标准曲线进行相应换算得到的亮氨酸含量,μg; V 为样液体积,mL; n 为稀释倍数;1.1515 为赖氨酸亮氨酸换算系数。

1.3.6 模拟体系反应后葡萄糖含量测定

参照严敏嘉等^[14]方法并进行适当改动,取 1 mL 1.3.1

中反应 12、24、36、48 h 样品加入 2 mL 3,5-二硝基水杨酸(dinitrosalicylic acid, DNS)试剂, 沸水浴 2 min, 取出后流水迅速冷却, 各加入 9.0 mL 蒸馏水, 摇匀, 540 nm 波长下测定吸光度值。

1.3.7 蛋白质巯基含量测定

参照 ELLMAN^[15]经典方法并进行适当改动。取 2.5 mL pH 8.0 的 0.1 mol/L 磷酸缓冲液(含 0.1 mol/L 乙二胺四乙酸二钠)和 50 μ L 二硫代二硝基苯甲酸, 分别加入 250 μ L 0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6 mmol/L L-半胱氨酸标准溶液和 1.3.1 反应 12、24、36、48 h 样品, 室温避光静置 20 min, 412 nm 波长下测定吸光度值。

1.3.8 蛋白质分子量测定

取 1.3.1 反应 36 h 样品进行十二烷基硫酸钠聚丙烯酰胺凝胶电泳(sodium dodecyl sulfate polyacrylamide gel electrophoresis, SDS-PAGE)。电泳条件: 10%浓度的分离胶, 5%浓度的浓缩胶, Tris-甘氨酸缓冲体系作为缓冲液, 上样量为 10 μ L; 电流为 20 mA; 染色剂为考马斯亮蓝。

1.4 数据处理

每组实验平行测定 3 次, 以 Excel 2019 和 SPSS Statistics 20 进行数据分析, 结果以平均值 $\pm$ 标准偏差表示。以最小显著性差异法(least significant difference, LSD)进行方差分析, $P<0.05$ 为具有显著性差异。

2 结果与分析

2.1 模拟体系中褐藻多酚对荧光性 AGEs 的抑制作用

AGEs 具有特殊的荧光特性与蛋白质交联特性, 可利用荧光分光光度计在特定激发发射波长下进行检测^[16], 荧光性 AGEs 相对含量以荧光强度 AU 表示。

本研究建立 BSA-Glucose 生成 AGEs 的体外模拟体系, 比较不同浓度褐藻多酚对体外模拟体系不同孵化时间下 AGEs 含量的影响, 结果如表 1 所示。随着反应时间延长, 各组 AU 逐渐降低($P<0.05$), 这可能是由于具有荧

光性的产物逐渐转化为褐色的没有荧光性的产物。从表 1 可以看出, 褐藻多酚在 BSA-Glucose 模拟反应体系中对荧光性 AGEs 生成具有抑制作用, 褐藻多酚质量浓度为 100 μ g/mL 反应 36 h 时, 对模拟体系中荧光性 AGEs 生成抑制率达 30.33%。

褐藻多酚对 BSA-Glucose 模拟体系中 AGEs 具有显著的抑制作用, 这与槲皮素、茶多酚、木犀草素和葛根素等对 AGEs 的抑制作用相一致^[5-7]。AGEs 为过量的糖和蛋白质结合的产物, 饮食摄入成为 AGEs 重要来源之一, 食源性 AGEs 参与衰老和相关疾病的进展^[5]。本研究结果可为进一步把褐藻多酚作为食品加工 AGEs 抑制剂开发利用提供理论基础和依据。

2.2 鱼肉肠体系中褐藻多酚对荧光性 AGEs 的抑制作用

不同浓度褐藻多酚对鱼肉肠中荧光性 AGEs 生成的影响如图 1 所示, 25 和 50 μ g/g 褐藻多酚对鱼肉肠体系 AGEs 生成具有显著抑制作用($P<0.05$), 褐藻多酚浓度为 50 μ g/g 抑制作用最为显著, 其抑制率达 41.91%。

已有的多酚类抗氧化物质对 AGEs 抑制的研究多以体外模拟体系进行, 本研究建立模拟食品热加工的鱼肉肠模型, 进一步在实际的食品体系中确证褐藻多酚对荧光性 AGEs 具有抑制作用。

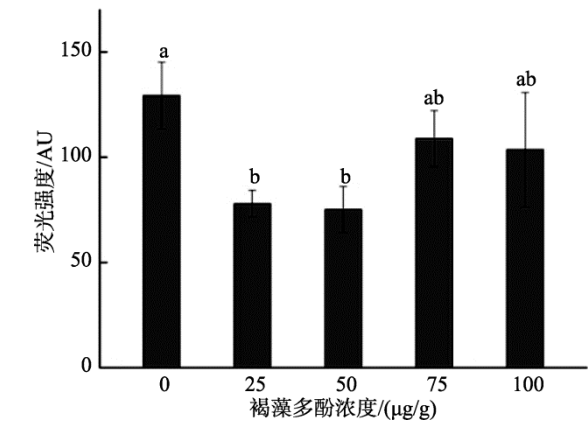
2.3 褐藻多酚对模拟体系中赖氨酸及葡萄糖含量变化的影响

晚期糖基化终产物为还原糖的羰基和游离的氨基在无酶情况下进行美拉德反应产生的对人体有害的化学物质^[17]。为进一步探究褐藻多酚对 BSA-Glucose 模拟体系中 AGEs 生成抑制作用的机制, 本研究分析了模拟体系反应底物赖氨酸和葡萄糖含量变化情况, 结果如表 2、3 所示。相同反应时间下, 不同浓度褐藻多酚组赖氨酸含量和葡萄糖含量均显著高于对照组($P<0.05$)。

表 1 模拟体系中荧光性 AGEs 的含量($n=3$, 荧光强度/AU)
Table 1 Content of fluorescent AGEs in simulated system ($n=3$, fluorescence intensity/AU)

时间/h	褐藻多酚浓度/(μ g/mL)				
	0	25	50	75	100
12	417.21 $\pm$ 7.8 ^{Ba}	317.98 $\pm$ 13.6 ^{Ba}	339.57 $\pm$ 18.9 ^{Aa}	315.46 $\pm$ 3.3 ^{Ba}	359.21 $\pm$ 20.0 ^{Aa}
24	182.68 $\pm$ 36.6 ^{Ab}	196.75 $\pm$ 12.3 ^{Ab}	206.22 $\pm$ 22.2 ^{Ab}	208.20 $\pm$ 7.9 ^{Ab}	215.36 $\pm$ 13.1 ^{Ab}
36	121.37 $\pm$ 14.3 ^{Ac}	119.13 $\pm$ 11.2 ^{Ac}	114.74 $\pm$ 22.4 ^{ABc}	120.86 $\pm$ 12.0 ^{Ac}	84.55 $\pm$ 25.7 ^{Bc}
48	34.82 $\pm$ 1.4 ^{Bd}	35.05 $\pm$ 1.1 ^{Bd}	34.36 $\pm$ 3.0 ^{Bd}	35.84 $\pm$ 7.6 ^{Bd}	49.07 $\pm$ 12.5 ^{Ad}

注: a、b、c、d 代表相同列中数值的显著性比较, A、B、C、D、E 代表相同行进行显著性比较, 相同的字母无显著性差异($P>0.05$), 不同的字母具有显著性差异($P<0.05$)。下表同。



注: a、b 不同字母表示具有显著性差异($P<0.05$)。

图 1 鱼肉肠体系中荧光性 AGEs 的含量($n=3$)

Fig.1 Content of fluorescent AGEs in fish sausage ($n=3$)

氨基酸残基如精氨酸、赖氨酸和半胱氨酸的氨基/巯基与活性二羰基化合物反应, 导致 AGEs 的形成^[6]。不同浓度褐藻多酚处理后, 相同反应时间下, 模拟反应体系中葡萄糖含量显著高于对照组($P<0.05$)。葡萄糖为活性二羰基化合物的前体物质, 葡萄糖含量越高, 提示模拟反应体系中活性二羰基化合物生成越少。

游离赖氨酸含量能反映模拟反应体系糖基化程度, 赖氨酸含量越高, 一般认为糖基化程度越低^[6]。已有研究表明多酚可与赖氨酸和精氨酸残基反应, 抑制 AGEs 两个

主要前体甲基乙二醛或乙二醛与游离氨基酸之间的键合, 从而降低 AGEs 生成^[18]。不同浓度褐藻多酚处理后, 模拟反应体系中赖氨酸含量显著高于对照组($P<0.05$), 这表明褐藻多酚可能与赖氨酸残基反应, 从而抑制蛋白质糖基化, 减少 AGEs 形成。

2.4 褐藻多酚对模拟体系中巯基含量变化的影响

蛋白质氧化可对人体健康造成一系列不良影响^[19], 而蛋白质巯基含量与蛋白质氧化程度密切相关。在 70 °C 的反应条件下, 随着反应时间的延长, 蛋白质氧化损失加剧, 各处理组蛋白质巯基含量逐渐升高(图 2), 这与 SHIMADA 等^[20]的研究结果一致。在反应 48 h 时, 不同浓度褐藻多酚处理组蛋白质巯基含量显著高于对照组($P<0.05$), 其中 100 µg/mL 褐藻多酚处理组在反应 48 h 后其蛋白质巯基含量高于对照组 38.02%(图 2)。这表明褐藻多酚可通过抑制蛋白质氧化、保护蛋白质巯基而降低 AGEs 的形成。

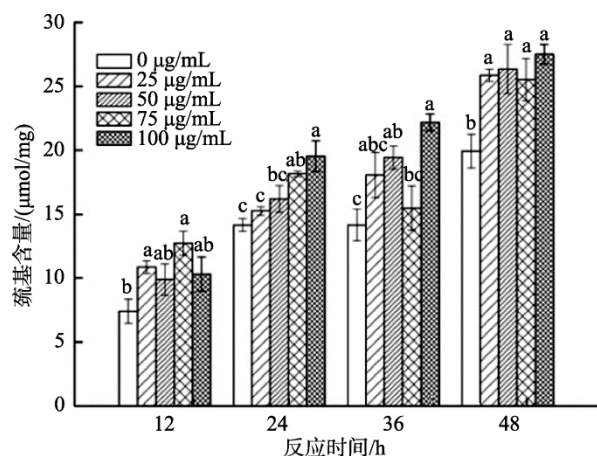
自由基参与 AGEs 的形成, 不同植物提取物对 AGEs 形成的抑制作用主要是由于它们含有大量具有抗氧化活性的酚类化合物^[15], 茶多酚、杨梅多酚和鱼腥草多酚等一系列抗氧化物质可通过降低活性氧含量、清除自由基等途径保护蛋白质巯基^[12,21-22]。褐藻多酚具有显著的抗氧化活性^[11], 其对蛋白质巯基的保护作用也可能与它具有抗氧化活性有关。

表 2 模拟体系中赖氨酸含量($n=3$, µg/mL)
Table 2 Lysine content in simulated system ($n=3$, µg/mL)

时间/h	褐藻多酚浓度/(µg/mL)				
	0	25	50	75	100
12	52.96±16.2 ^{Cab}	141.66±43.2 ^{Ba}	197.16±58.6 ^{ABa}	239.17±40.0 ^{Aa}	243.84±45.3 ^{Ab}
24	82.52±34.4 ^{Da}	127.13±15.8 ^{Ca}	112.09±13.6 ^{Cb}	180.56±23.4 ^{Bb}	330.46±40.6 ^{Aa}
36	35.01±31.2 ^{Dab}	81.33±12.2 ^{Cb}	97.06±13.7 ^{Cc}	109.28±8.6 ^{Bc}	143.50±11.1 ^{Ac}
48	16.96±3.0 ^{Db}	48.81±15.1 ^{BCc}	38.95±16.2 ^{BCd}	63.85±30.6 ^{Bd}	187.30±28.9 ^{Ab}

表 3 模拟体系中葡萄糖含量($n=3$, mg/mL)
Table 3 Glucose content in simulated system ($n=3$, mg/mL)

时间/h	褐藻多酚浓度/(µg/mL)				
	0	25	50	75	100
12	0.71±0.25 ^{Bab}	1.26±0.12 ^{Aab}	1.44±0.09 ^{Aa}	1.32±0.15 ^{Aa}	1.18±0.08 ^{Ab}
24	0.68±0.15 ^{Dab}	1.12±0.16 ^{BCb}	0.98±0.01 ^{Cc}	1.23±0.19 ^{ABa}	1.37±0.04 ^{Aa}
36	0.54±0.22 ^{Cb}	1.09±0.03 ^{Bb}	1.25±0.09 ^{ABb}	1.41±0.07 ^{Aa}	1.31±0.03 ^{Aab}
48	0.94±0.03 ^{Da}	1.37±0.05 ^{BCa}	1.57±0.10 ^{Aa}	1.43±0.06 ^{ABa}	1.19±0.18 ^{Cab}



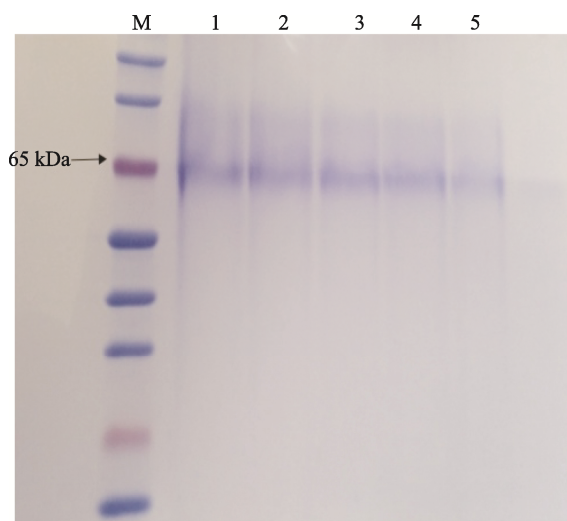
注: a~c 不同字母表示具有显著性差异($P < 0.05$)。

图2 褐藻多酚对模拟体系中蛋白质巯基的影响($n=3$)

Fig.2 Effects of brown algae polyphenols on protein sulfhydryl groups in simulated system ($n=3$)

2.5 褐藻多酚对模拟体系中蛋白质分子量的影响

为进一步揭示褐藻多酚抑制 AGEs 生成机制,对 BSA-Glucose 模拟体系反应 36 h 后进行了 SDS-PAGE 分析,结果如图 3 所示,模拟体系中蛋白质电泳条带中除了含有牛血清蛋白主条带之外,还分别出现一条亚基带,亚基带为葡萄糖与牛血清蛋白交联产物。从图 3 可以看成,不同浓度褐藻多酚处理后,葡萄糖与牛血清蛋白交联亚基带量显著低于对照组($P < 0.05$),其中以 100 $\mu\text{g/mL}$ 褐藻多酚处理最为明显。



注: M. 蛋白质相对质量标准; 1. 对照组; 2. 25 $\mu\text{g/mL}$; 3. 50 $\mu\text{g/mL}$; 4. 75 $\mu\text{g/mL}$; 5. 100 $\mu\text{g/mL}$ 。

图3 模拟体系蛋白质 SDS-PAGE 图

Fig.3 SDS-PAGE diagram of protein in simulated system

糖基氧化后期可诱导蛋白质交联和聚集,还原糖容

易与赖氨酸和精氨酸残基反应形成分子间交联和高分子量的蛋白质聚集体^[23]。MUTHENNA 等^[24]通过建立山羊眼晶状体蛋白与果糖体外生成 AGEs 反应模型,发现芦丁显著抑制体外模型 AGEs 生成,并通过 SDS-PAGE 发现芦丁显著抑制山羊眼晶状体蛋白与果糖的交联。刘玲等^[22]发现茶多酚抑制 BSA-Glucose 模拟体系中牛血清蛋白与葡萄糖的交联反应。本研究的结果与这些研究结果相一致,提示褐藻多酚等酚类物质可通过阻止葡萄糖与牛血清蛋白交联而抑制糖基化,降低 AGEs 的生成。褐藻多酚具有的清除自由基和对蛋白质巯基氧化的保护能力可能有助于防止蛋白质交联和聚集的形成。

3 结论与讨论

褐藻多酚对 BSA-Glucose 体外模拟反应体系和食品热加工鱼肉肠体系荧光性 AGEs 均具有显著抑制作用,100 $\mu\text{g/g}$ 褐藻多酚处理 BSA-Glucose 模拟体系反应 36 h 后,AGEs 抑制率达 30.33%; 50 $\mu\text{g/mL}$ 褐藻多酚处理鱼肉肠,AGEs 抑制率达 41.91%。褐藻多酚可能与赖氨酸残基反应而抑制蛋白质糖基化,也可能抑制蛋白质氧化,保护蛋白质巯基,抑制葡萄糖与牛血清蛋白交联作用,从而降低 AGEs 的生成。研究结果对进一步开发利用褐藻类资源,降低加工食品中 AGEs 产生具有一定的参考意义。

参考文献

- [1] 付全意. 食品模拟体系糖化反应过程中羧甲基赖氨酸的形成和抑制[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- [2] FU QY. Formation and inhibition of carboxymethyl lysine during saccharification reaction in food simulation system [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [3] REN X, REN L, WEI Q, *et al.* Advanced glycation end-products decreases expression of endothelial nitric oxide synthase through oxidative stress in human coronary artery endothelial cells [J]. Cardiovasc Diabetol, 2017, 16(1): 52.
- [4] HU P, ZHOU H, LU M, *et al.* Autophagy plays a protective role in advanced glycation end product-induced apoptosis in cardiomyocytes [J]. Cell Physiol Biochem, 2015: 37(2): 697-706.
- [5] ZHU Y, SHU T, LIN Y, *et al.* Inhibition of the receptor for advanced glycation endproducts (RAGE) protects pancreatic beta-cells [J]. Biochem Biophys Res Commun, 2011, 404(1): 159-165.
- [6] CHEN G, MADL RL, SMITH JS. Inhibition of advanced glycation endproducts in cooked beef patties by cereal bran addition [J]. Food Control, 2017, 73: 847-853.
- [7] LIN J, ZHOU W. Role of quercetin in the physicochemical properties, antioxidant and antiglycation activities of bread [J]. J Funct Food, 2018, 40: 299-306.
- [8] 周凯文, 陈晓默, 刘慧琳, 等. 多酚黄酮物质对晚期糖基化终产物的抑制研究[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(4): 7-13.
- [9] ZHOU KW, CHEN XM, LIU HL, *et al.* The inhibition of polyphenols and flavonoids on advanced glycation end products [J]. Food Res Dev, 2018,

- 39(4): 7-13.
- [8] 袁媛, 侯雪峰, 封亮, 等. 葛根素对体内外晚期糖基化终末产物形成的抑制作用[J]. 中草药, 2017, 7: 1386-1390.
- YUAN Y, HOU XF, FENG L, *et al.* Inhibitory effect of puerarin on the formation of advanced glycation end products *in vivo* and *in vitro* [J]. Chin Herb Med, 2017, 7: 1386-1390.
- [9] 戴世城, 徐晨, 戈雨秋, 等. 藻类多酚的研究进展[J]. 现代农业科技, 2018, 17: 183-185.
- DAI SC, XU C, GE YQ, *et al.* Research progress of algae polyphenols [J]. Mod Agric Sci Technol, 2018, 17: 183-185.
- [10] 杨会成, 曾名勇, 董士远, 等. 海带多酚的分离、纯化及抗肿瘤活性[C]. 2007 年中国水产学会学术年会暨水产微生态调控技术论坛论文摘要汇编, 2007.
- YANG HC, ZENG MY, DONG SY, *et al.* Isolation, purification and antitumor activity of kelp polyphenols [C]. Summary of papers at the academic annual meeting of China Fisheries Society and aquatic micro ecological regulation technology forum in 2007, 2007.
- [11] VIJAYABASKAR P, SHIYAMALA V. Antioxidant properties of seaweed polyphenol from *Turbinaria ornata* (Turner) J. Agardh, 1848 [J]. Asian Pacif J Trop Biol, 2012, 2(1): 90-98.
- [12] 夏其乐, 陈剑兵, 曹艳, 等. 杨梅多酚对晚期糖基化终末产物的抑制作用[J]. 中国食品学报, 2018, 18(11): 19-26.
- XIA QL, CHEN JB, CAO Y, *et al.* Inhibitory effect of *Myrica rubra* polyphenols on advanced glycation end products [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2018, 18(11): 19-26.
- [13] 吴凤山. 小麦中赖氨酸含量快速测定法的研究[J]. 吉林师范大学学报(自然科学版), 2002, (4): 66-67.
- WU FS. Study on rapid determination of lysine in wheat [J]. J Jilin Normal Univ (Nat Sci Ed), 2002, (4): 66-67.
- [14] 严敏嘉, 李小芳, 赵甜甜, 等. 红曲固态发酵过程中糖类物质的动态变化分析[J]. 食品研究与开发, 2018, 328(3): 88-92.
- YAN MJ, LI XF, ZHAO TT, *et al.* Dynamic change analysis of sugars in *Monascus* solid-state fermentation [J]. Food Res Dev, 2018, 328(3): 88-92.
- [15] ELLMAN GL. Tissue sulfhydryl groups [J]. Arch Biochem Biophys, 1959, 82(1): 70-77.
- [16] 许良元, 朱灵, 张龙, 等. 荧光光谱技术在晚期糖基化终末产物中的应用[J]. 压电与声光, 2010, 32(2): 187-190.
- XU LY, ZHU L, ZHANG L, *et al.* Application of fluorescence spectroscopy in advanced glycation end products [J]. Piezoelectric Acoustooptic, 2010, 32(2): 187-190.
- [17] 孙緬恩, 杜冠华. 晚期糖基化终产物的病理意义及其机制[J]. 中国药理学通报, 2002, 18(3): 246.
- SUN MEN, DU GH. Pathological significance and mechanism of advanced glycation end products [J]. Chin Pharmacol Bull, 2002, 18(3): 246.
- [18] NAGARAJ RH, SARKAR P, MALLY A, *et al.* Effect of pyridoxamine on chemical modification of proteins by carbonyls in diabetic rats: Characterization of a major product from the reaction of pyridoxamine and methylglyoxal [J]. Arch Biochem Biophys, 2002, 402: 110-119.
- [19] ESTÉVEZ M. Protein carbonyls in meat system: A review [J]. Meat Sci, 2011, 89(3): 259-279.
- [20] SHIMADA K, CHEFTEL JC. Determination of sulfhydryl groups and disulfide bonds in heat-induced gels of soy protein isolate [J]. J Agric Food Chem, 1988, 36(1): 147-153.
- [21] YOON SR, SHIM SM. Inhibitory effect of polyphenols in *Houttuynia cordata* on advanced glycation end-products (AGEs) by trapping methylglyoxal [J]. LWT-Food Sci Technol, 2015, 61, 158-163.
- [22] 刘玲, 闫凤娇, 石飞, 等. 食品加工中晚期糖基化终产物的变化趋势及茶多酚对其抑制作用[J]. 中国食品学报, 2016, 16(5): 95-102.
- LIU L, YAN FJ, SHI F, *et al.* The change trend of AGEs in the food process and the inhibition function of tea polyphenols [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2016, 16(5): 95-102.
- [23] DELGADO-ANDRADE C, VINCENZO F. Dietary advanced glycosylation end-products (dAGEs) and melanoidins formed through the maillard reaction: physiological consequences of their intake [J]. Annual Rev Food Sci Technol, 2018, 9: 271-291.
- [24] MUTHENNA P, AKILESHWARI C, SARASWAT M, *et al.* Inhibition of advanced glycation end-product formation on eye lens protein by rutin [J]. Brit J Nutr, 2012, 107(7): 941-949.

(责任编辑: 于梦娇 郑 丽)

作者简介



张宇臣, 主要研究方向为食品质量与安全。

E-mail: 1483753915@qq.com



孙海燕, 高级实验师, 主要研究方向为食品营养与安全。

E-mail: sunhy@zjou.edu.cn