

# 小麦胚芽蛋白糖基化产物抗氧化特性研究

## Study on antioxidant properties of glycosylated products of wheat germ protein

牛秋云

NIU Qiu-yun

(德州职业技术学院, 山东 德州 253034)

(Dezhou Vocational and Technical College, Dezhou, Shandong 253034, China)

**摘要:**目的:探究小麦胚芽蛋白糖基化产物的抗氧化特性。方法:采用超声波辅助湿热法制备小麦胚芽蛋白(WGP)与葡萄糖(Glucose)的糖基化产物(WGP-G),通过测定不同超声时间(10,20,30,40,50,60 min)、不同反应温度(70,80,90 ℃)下 WGP-G 的褐变程度、接枝度、还原能力、羟自由基清除能力、超氧阴离子自由基、DPPH 自由基清除能力和 ABTS<sup>+</sup> 自由基清除能力等指标,综合评价糖基化反应对 WGP 抗氧化能力的影响。结果:WGP-G 褐变度随超声时间和反应温度的不断增大而增大,接枝度、还原能力、羟自由基清除能力、超氧阴离子自由基清除能力、DPPH 自由基清除能力和 ABTS<sup>+</sup> 自由基清除能力均随反应温度的不断增大而增大,但随超声时间的延长呈先增大后减小趋势。结论:超声时间和反应温度均能影响 WGP-G 的抗氧化特性。

**关键词:**小麦胚芽;蛋白质;葡萄糖;糖基化;抗氧化

**Abstract:** Objective: This study aimed to investigate the antioxidant properties of wheat germ protein glycosylation product. Methods: The glycation product (WGP-G) of wheat germ protein (WGP) and glucose was prepared by ultrasonic assisted moist heat method. Different ultrasonic time (10, 20, 30, 40, 50 and 60 min) and reaction temperature (70, 80 and 90 ℃) were measured. The browning degree, grafting degree, reducing power, hydroxyl radical scavenging capacity, superoxide anion radical scavenging capacity, DPPH radical scavenging capacity and ABTS<sup>+</sup> radical scavenging capacity of WGP-G at 90 ℃ were evaluated comprehensively. Results: The browning degree of WGP-G increased with the increase of ultrasonic time and reaction temperature. The grafting degree, reducing power, hydroxyl radical scavenging ability, superoxide anion radical

scavenging, DPPH radical scavenging ability and ABTS<sup>+</sup> radical scavenging ability all increased with the increase of reaction temperature, but showed a trend of first increasing and then decreasing with the extension of ultrasonic time. Conclusion: The antioxidant properties of WGP-G were affected by ultrasonic time and reaction temperature.

**Keywords:** wheat germ; protein; glucose; glycosylation; antioxidation

小麦胚芽蛋白是小麦加工副产物,也是小麦胚芽中的一种营养组分,其必需氨基酸组成比例接近 FAO/WHO 推荐值,是一种完全蛋白,含有常见谷物蛋白中所缺乏的赖氨酸、苏氨酸和甲硫氨酸。一直以来,小麦胚芽主要以饲料的形式进行销售,小麦胚芽蛋白的附加值还未得到充分的发掘。

随着蛋白质组学研究的逐步深入,蛋白质糖基化处理改善蛋白抗氧化特性的研究引起了很多学者的关注。夏秀芳等<sup>[1-2]</sup>通过研究大豆分离蛋白—葡萄糖糖基化产物的抗氧化特性证实大豆蛋白—葡萄糖反应生成的大豆糖蛋白具有很强的抗氧化性,尤其还原力比糖基化处理前的大豆分离蛋白的高 5.6 倍,此外 DPPH 自由基清除能力也高达 68.55%。江连洲等<sup>[3]</sup>对绿豆蛋白糖基化产物抗氧化性的研究发现,反应温度越高,褐变度也越高,相应的抗氧化物质生成量也越多。张志颖等<sup>[4]</sup>研究了乳清蛋白和多糖抗氧化性物质的制备条件与抗氧化特性,发现多糖的添加与接枝度、褐变度和抗氧化能力呈正相关。胡晓等<sup>[5]</sup>对裂壶藻蛋白肽美拉德反应产物抗氧化特性的研究表明,反应时间、反应温度、糖的种类等因素均影响美拉德反应产物褐变度和抗氧化活性的大小。赵玉滨等<sup>[6]</sup>研究发现糖基化改性可以提高酪蛋白酶解产物的抗氧化活性。目前小麦胚芽蛋白的研究多集中在提取方法<sup>[7-8]</sup>、酶解产物的制备及免疫活性<sup>[9]</sup>、抗氧化活性<sup>[10-12]</sup>等方面,有关小麦胚芽蛋白糖基化产物抗氧化特性的研

**基金项目:**德州市市级研发计划项目(编号:2020KJC-TZ-039-1250)

**作者简介:**牛秋云(1984—),女,德州职业技术学院讲师,硕士。  
E-mail: niuqiuyun2008@163.com

**收稿日期:**2022-08-16 **改回日期:**2023-03-06

究还未见报道。

研究拟以小麦胚芽蛋白和葡萄糖为原料,通过超声波辅助湿热法制备糖基化产物,探究生产条件对产物抗氧化特性的影响,以期开发更高附加值的小麦胚芽蛋白产品提供参考。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 材料与试剂

小麦胚芽蛋白:蛋白质含量 89.12%,实验室自制;

葡萄糖:分析纯,中国医药(集团)上海化学试剂公司;

OPA:分析纯,上海源叶生物有限公司;

DPPH、 $\beta$ -巯基乙醇、焦性没食子酸:生化试剂,美国 Sigma 公司;

邻二氯菲:分析纯,天津市科密欧化学试剂科技有限公司;

ABTS:生化试剂,上海翌圣生物科技有限公司;

铁氰化钾、硫酸亚铁、过氧化氢:分析纯,天津市北辰方正试剂厂;

Tris:电泳级,北京鼎国生物技术有限责任公司;

过硫酸钾:分析纯,天津博迪化工有限公司。

### 1.2 仪器与设备

离心机: TG16-WS 型,上海卢湘仪离心机仪器有限公司;

冷冻干燥机: HUAXI-1A-50 型,上海华玺科学仪器有限公司;

电子天平: FA1004A 型,上海精天电子仪器有限公司;

紫外分光光度计: TU-1901 型,北京普析通用仪器有限公司;

电热恒温水浴锅: HH-4 型,济南优科实验设备有限公司;

pH 计: PHS-25 型,上海今迈仪器仪表有限公司;

磁力搅拌机: C-MAG HS4 型,德国 IKA 公司;

酶标仪: Spark20M 型,上海勒菲生物科技有限公司;

超声波清洗仪: KL-040 型,上海仪天科学仪器有限公司。

### 1.3 试验方法

1.3.1 小麦胚芽蛋白糖基化产物(WGP-G)的制备 参照文献[13-14]的方法略作改变。称取 0.5 g 小麦胚芽蛋白,溶于 0.1 mol/L 磷酸盐缓冲液中配制成 5 mg/mL 的溶液,按  $m_{\text{蛋白}} : m_{\text{葡萄糖}} = 1 : 1$  的比例加入葡萄糖,搅拌 10 min,使蛋白与葡萄糖充分混合均匀,调 pH 至 9.0,然后分别取蛋白-葡萄糖的混和液 50 mL 于 100 mL 小烧杯中,分别预热到 70, 80, 90  $^{\circ}\text{C}$ ,于超声波清洗仪中分别处理 10, 20, 30, 40, 50, 60 min,反应结束冰浴至室温,4 500 r/min 离心 10 min,取上清液于 4  $^{\circ}\text{C}$  透析 24 h,透析

液冷冻干燥(预冻温度  $-50^{\circ}\text{C}$ 、预冻时间 3 h、升华干燥真空度 100 Pa、升华干燥温度  $65^{\circ}\text{C}$ 、解析干燥真空度 75 Pa、解析干燥温度  $45^{\circ}\text{C}$ )成干粉备用,以不加葡萄糖的小麦胚芽蛋白溶液作对照。

1.3.2 褐变度( $A_{420\text{nm}}$ )的测定 称取 25 mg 的待测样品,溶于蒸馏水配制成质量浓度为 2 mg/mL 的蛋白溶液,以纯水作空白样,在 420 nm 处测吸光度,用吸光值的大小来反映 WGP-G 的褐变程度<sup>[13]</sup>。

1.3.3 接枝度测定 参照 Church 等<sup>[16]</sup>和 Jiang 等<sup>[17]</sup>的方法。称取 80 mg 的 OPA 溶解于 2.0 mL 甲醇溶液中,然后依次加入 5.0 mL 0.2 g/mL 的 SDS 溶液、50.0 mL 10 mmol/L 的硼砂溶液和 0.2 mL  $\beta$ -巯基乙醇,混匀后用蒸馏水定容至 100 mL,得 OPA 试剂。测定样液时,取 OPA 试剂 4 mL 于试管中,分别加入 0.2 mL 样品液,充分摇匀于 35  $^{\circ}\text{C}$  下反应 2 min,于 340 nm 波长处进行吸光度( $A_t$ )测定,以在 OPA 试剂中加入 200  $\mu\text{L}$  去离子水为空白样。按式(1)计算接枝度。

$$D_G = \frac{c_0 - c_t}{c_0} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

$D_G$ ——接枝度, %;

$c_0$ ——反应初始的游离氨基浓度, mol/L;

$c_t$ ——反应时间为  $t$  时的游离氨基浓度, mol/L。

1.3.4 还原能力( $A_{700\text{nm}}$ )测定 参照胡晓等<sup>[5]</sup>和 Yen 等<sup>[18]</sup>的方法并修改。分别取 1.0 mL 待测样液(质量浓度为 5 mg/mL)于 10.0 mL 离心管中,再依次加入相同体积 pH 6.6、0.2 mol/L 的磷酸盐缓冲液和 1.0% 的铁氰化钾溶液,振摇均匀,50  $^{\circ}\text{C}$  水浴反应 20 min。加入 1.0 mL 10% 的三氯乙酸溶液,充分混匀,4 000 r/min 离心 10 min,取上清液 1.0 mL,用等体积去离子水稀释,再加入 0.2 mL 0.1% 的氯化铁溶液,振摇混匀,50  $^{\circ}\text{C}$  水浴反应 10 min,待溶液体系变为蓝色,用酶标仪于 700 nm 处测定吸光度。以去离子水代替待测样液为空白样。

1.3.5 羟自由基清除能力测定 参照 Chevalier 等<sup>[19]</sup>和 Li 等<sup>[20]</sup>的测定方法并修改。先将 1.0 mL 1.5 mmol/L 邻二氯菲溶液、2.0 mL 磷酸盐缓冲液(pH 7.4)和 1.0 mL 蒸馏水充分混匀,然后加入 1.5 mmol/L 硫酸亚铁溶液和 0.02% 过氧化氢溶液各 1.0 mL,于 37  $^{\circ}\text{C}$  反应 60 min,于 536 nm 处测得吸光度为  $A_1$ ;用 1.0 mL 蒸馏水代替 1.0 mL 过氧化氢测得吸光度为  $A_0$ ,用 1.0 mL 待测样液(质量浓度为 5 mg/mL)代替蒸馏水测得吸光度  $A_2$ 。按式(2)计算样品对羟自由基的清除率。

$$H_{RS} = \frac{A_2 - A_1}{A_0 - A_1} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

$H_{RS}$ ——羟自由基的清除能力, %;

$A_0$ ——空白吸光度;

$A_1$ ——羟自由基吸光度；

$A_2$ ——样品清除羟自由基吸光度。

1.3.6 超氧阴离子自由基清除能力测定 参照李灵诚<sup>[21]</sup><sup>[55]</sup>和 Fu 等<sup>[22]</sup>的方法并修改。将 1.0 mL 待测样液加入 3.0 mL、50 mmol/L、pH 8.2 的 Tris-HCl 缓冲溶液中，混匀后于 25 °C 下反应 20 min，再移取 3.0 mL、7 mmol/L 焦性没食子酸溶液加入上述溶液中反应 5 min，用 1.0 mL 浓 HCl 终止反应，于 325 nm 测定吸光度  $A_0$ 。按式(3)计算超氧阴离子自由基清除率。

$$S_{ARS} = \frac{A_0 - (A_1 - A_2)}{A_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中：

$S_{ARS}$ ——超氧阴离子自由基清除能力，%；

$A_0$ ——去离子水代替样品溶液在 325 nm 处的吸光度；

$A_1$ ——样液在 325 nm 处的吸光度；

$A_2$ ——样液中不加焦性没食子酸在 325 nm 处的吸光度。

1.3.7 DPPH 自由基清除能力测定 参照夏琪娜<sup>[23]</sup><sup>[16]</sup>和 Nooshkam 等<sup>[24]</sup>的方法并修改。取待测样液 1.0 mL(质量浓度为 5 mg/mL)于离心管中，加入 6.0 mL 0.2 mmol/L 的 DPPH 乙醇溶液，充分均匀，然后将溶液在室温避光条件下反应 30 min，4 500 r/min 离心 10 min。取上清液于 517 nm 处测定吸光值。按式(4)计算 DPPH 自由基清除能力。

$$D_{PPH-RE} = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_3}\right) \times 100\% \quad (4)$$

式中：

$D_{PPH-RE}$ ——DPPH 自由基清除能力，%；

$A_1$ ——样品与 DPPH 溶液在 517 nm 处吸光度；

$A_2$ ——样品与 95%乙醇在 517 nm 处吸光度；

$A_3$ ——95%乙醇与 DPPH 溶液在 517 nm 处吸光度。

1.3.8 ABTS<sup>+</sup> 自由基清除能力测定 参照钟比真<sup>[25]</sup>和 Thaipong 等<sup>[26]</sup>的方法并修改。将 7 mmol/L 的 ABTS 溶液与 2.45 mmol/L 过硫酸钾溶液等体积混匀，于黑暗处反应 16 h，再用磷酸缓冲溶液稀释到可用范围(25 °C 于 734 nm 处测其光度吸收值为 0.70 即可)。取 200  $\mu$ L 待测溶液(质量浓度为 5 mg/mL)与 4.0 mL ABTS 试剂混匀，室温下反应 10 min，然后于 734 nm 下测定其光度吸收值，记作 A。按式(5)计算 ABTS<sup>+</sup> 自由基清除能力。

$$T_{BTS-RS} = \left(1 - \frac{A}{A_0}\right) \times 100\% \quad (5)$$

式中：

$T_{BTS-RS}$ ——ABTS<sup>+</sup> 自由基清除能力，%；

A——样液在 734 nm 处测定的吸光度；

$A_0$ ——蒸馏水代替样液在 734 nm 处测定的吸光度。

1.3.9 数据处理及分析 各试验均测定 3 次，试验结果均用其平均值表示，使用 Excel 2019 和 SPSS 23 进行作图与数据分析，采用单因素方差分析法进行显著性差异分析，当  $P < 0.05$  时，表示差异显著。

## 2 结果与分析

### 2.1 超声时间和反应温度对糖基化产物褐变度的影响

由图 1 可知，反应温度越高，WGP-G 的褐变度越大，当反应温度为 90 °C 时其褐变度显著( $P < 0.05$ )高于 70、80 °C 的，说明反应温度越高越利于糖基化反应的进行，与夏琪娜<sup>[23]</sup><sup>[21-24]</sup>的结果一致。当反应温度一定时，随着超声时间的延长，褐变度也逐渐增大，因为超声波的作用时间越长，蛋白质的结构就越伸展，这更利于葡萄糖进入蛋白质内部参与羰氨反应。葛伟等<sup>[27]</sup>在进行超声预处理酪蛋白美拉德反应产物抗氧化性影响的研究中得到相似的结果。但褐变度过大会影响食品的感官品质，所以实际生产中往往采用不同的加工技术来控制美拉德反应的程度。

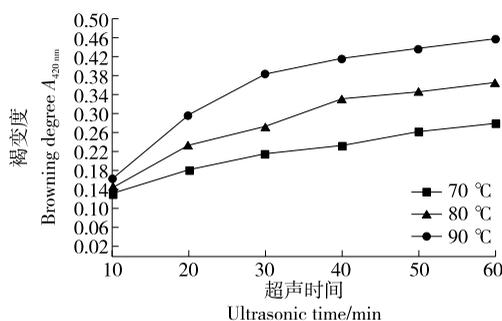


图 1 超声时间和反应温度对糖基化产物褐变度的影响  
Figure 1 Effects of ultrasonic time and reaction temperature on browning degree of glycation products

### 2.2 超声时间和反应温度对糖基化产物接枝度的影响

由图 2 可知，随着反应温度的升高，WGP-G 的接枝度不断增大，因为反应温度越高，蛋白质因变性结构越伸展，蛋白质内部的自由氨基被更多地暴露出来，为葡萄糖的羰氨反应提供了条件。当反应温度一定时，随着超声时间的不断延长，WGP-G 的接枝度呈先增加后降低趋势。当反应温度为 90 °C 时，WGP-G 的接枝度在前 30 min 内急剧增加，但继续延长其接枝度趋于平缓而后有降低的趋势，这是因为一定时间的超声波处理有助于蛋白质伸展结构，进而增强与葡萄糖的糖基化反应，超声时间继续延长，蛋白质会因过度变性而造成聚集，从而减少了与糖的接触机会，导致 WGP-G 的接枝度降低。这与章银良等<sup>[28]</sup>的结果类似。当反应温度为 70、80 °C 时，WGP-G 的接枝度也呈先增加后降低趋势且均在 50 min 时达到最大值。

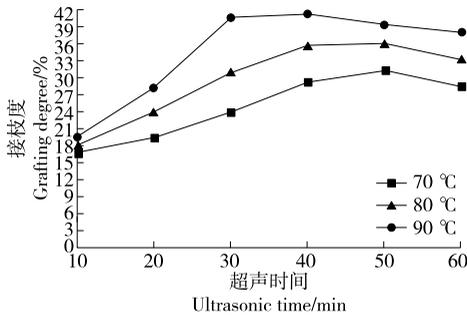


图2 超声时间和反应温度对糖基化产物接枝度的影响  
Figure 2 Effects of ultrasonic time and reaction temperature on grafting degree of glycosylated products

### 2.3 超声时间和反应温度对糖基化产物还原能力的影响

由图3可知,随着反应温度的升高,WGP-G的还原能力逐渐增大,70 °C时WGP-G还原能力增加的幅度较小,80 °C时还原能力从20 min开始显著( $P < 0.05$ )增加,90 °C时还原能力在60 min时达到最大(0.548 7)。当反应温度一定时,随着超声时间的延长,还原力先增大后趋于平缓,这与糖基化反应接枝度和褐变度的变化趋势是一致的,由此可以证明还原能力与糖基化产物的生成量有很大的相关性,葛伟等<sup>[27]</sup>也得到了相似的结果。

### 2.4 超声时间和反应温度对糖基化产物清除羟自由基能力的影响

由图4可知,随着反应温度的升高,WGP-G的羟自由基清除能力不断增强,当温度升至90 °C时,羟自由基清除能力最大,为40.02%。随着超声时间的延长,70 °C下羟自由基清除能力逐渐上升,80 °C下呈现先增大而后趋于平缓的趋势。这是因为羟自由基的氧原子上含有一个未配对的且具有很强的夺取电子能力的电子,随着反应时间的延长,WGP-G的生成量不断增加,影响了其配对电子的获取,故呈现出与接枝度一样的变化规律。这与章银良等<sup>[28]</sup>和袁照路<sup>[29]</sup>的研究结论一致。

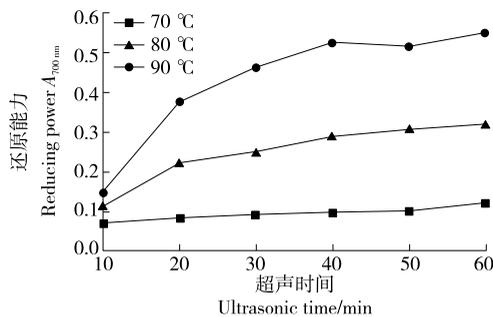


图3 超声时间和反应温度对糖基化产物还原能力的影响

Figure 3 Effects of ultrasonic time and reaction temperature on reducing power of glycosylated products

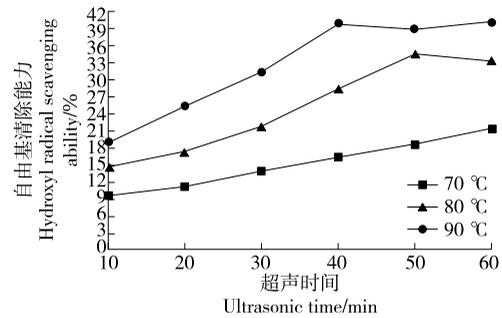


图4 超声时间和反应温度对糖基化产物自由基清除能力的影响

Figure 4 Effects of ultrasonic time and reaction temperature on hydroxyl radical scavenging ability of glycosylated products

### 2.5 超声时间和反应温度对糖基化产物清除超氧阴离子自由基能力的影响

由图5可知,随着超声时间的延长,WGP-G的超氧阴离子自由基清除能力呈先升高后略下降的趋势;70, 80, 90 °C时WGP-G对超氧阴离子自由基清除能力分别在50, 50, 40 min时达到峰值,继续加热反应,WGP-G的超氧阴离子自由基清除能力却快速下降,可能是由于试验过程中过度的热处理,导致蛋白质的结构过度松散,蛋白质分子发生了聚集,故超氧阴离子自由基清除能力随之下降,江连洲等<sup>[3]</sup>在绿豆蛋白糖基化产物抗氧化性研究中也得出一样的结论。

### 2.6 超声时间和反应温度对糖基化产物清除DPPH自由基能力的影响

由图6可知,WGP-G对DPPH自由基的清除能力随反应温度的增加而逐渐增大,70 °C时,随着超声时间的不断延长,DPPH自由基的清除能力也逐渐增大,但80, 90 °C时,却呈先增大后降低趋势,可能是因为不同温度下WGP-G的生成量不同,与DPPH的结合形成产物DPPH-H的能力也不一样,所以WGP-G对DPPH自由基的清除能力也不同,与章银良等<sup>[28]</sup>的研究结果一致。

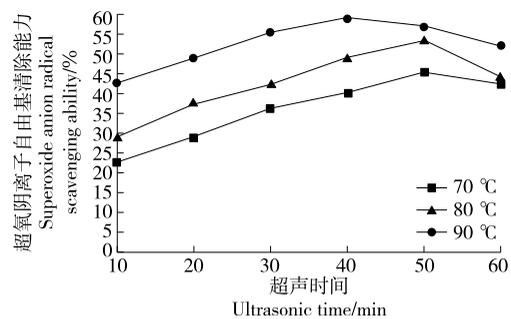


图5 超声时间和反应温度对糖基化产物超氧阴离子自由基清除能力的影响

Figure 5 Effects of ultrasonic time and reaction temperature on superoxide anion radical scavenging ability of glycosylated products

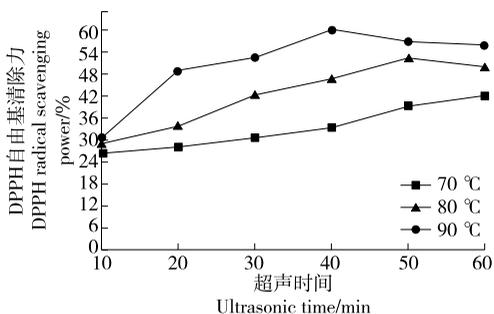


图 6 超声时间和反应温度对糖基化产物 DPPH 自由基清除力的影响

Figure 6 Effects of ultrasonic time and reaction temperature on DPPH radical scavenging power of glycosylated products

### 2.7 超声时间和反应温度对糖基化产物清除 ABTS<sup>+</sup>自由基能力的影响

由图 7 可知, WGP-G 对 ABTS<sup>+</sup> 自由基的清除能力整体较强, 其中 90 °C, 40 min 时高达 54.22%。80, 90 °C 下超声处理 50 min 后, ABTS<sup>+</sup> 自由基清除能力出现下降, 原因可能是蛋白质因长时间受高温及超声波处理造成聚集, 阻碍了蛋白质与葡萄糖的糖基化反应, 使糖基化产物得率下降, 抗氧化能力也下降, 而 70 °C 下超声处理 60 min 时, ABTS<sup>+</sup> 自由基清除能力略有增大, 可能是因为糖基化反应过程中生成了更多具有自由基清除能力的类黑精<sup>[21]56</sup>。

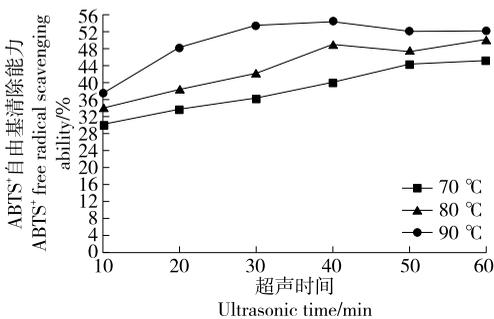


图 7 超声时间和反应温度对糖基化产物 ABTS<sup>+</sup> 自由基清除能力的影响

Figure 7 Effects of ultrasonic time and reaction temperature on ABTS<sup>+</sup> free radical scavenging ability of glycosylated products

## 3 结论

通过研究不同超声时间和反应温度条件下小麦胚芽蛋白-葡萄糖糖基化产物的抗氧化特性发现, 超声时间和反应温度不但会对接枝度和褐变度产生影响, 而且对产物的抗氧化性产生不同程度的影响。研究表明, 将反应温度从 70 °C 提高到 90 °C, 糖基化产物的接枝度、褐变度、还原能力、羟自由基清除能力、超氧阴离子自由基清

除能力、DPPH 自由基清除能力和 ABTS<sup>+</sup> 自由基清除能力均得到不同程度的提高, 反应温度的升高, 使蛋白质-糖的糖基化反应程度不断加强, 越来越多的还原糖引入蛋白质, 使蛋白质的抗氧化性得到有效改善。当反应温度为 90 °C, 超声时间为 40 min 时, 羟自由基清除能力、超氧阴离子自由基清除能力、DPPH 自由基清除能力和 ABTS<sup>+</sup> 自由基清除能力均达到最大值, 但各指标的清除能力并不相同, 说明小麦胚芽蛋白-葡萄糖糖基化产物对不同抗氧化指标的影响程度不同。通过研究表明, 控制超声时间和反应温度能获得不同抗氧化性的小麦胚芽蛋白-葡萄糖糖基化产物, 但超声波辅助糖基化提高小麦胚芽蛋白抗氧化性的机理还有待进一步研究。

### 参考文献

- [1] 夏秀芳, 王博, 郑幸子, 等. 大豆糖蛋白的抗氧化特性[J]. 食品科学, 2018, 39(7): 91-97.
- [2] 夏秀芳, 李芳菲, 潘勇, 等. 大豆糖蛋白的抗氧化特性及其机理[J]. 中国食品学报, 2019, 19(2): 47-53.
- [3] 江连洲, 张潇元, 伍丹, 等. 葡聚糖糖基化处理对绿豆蛋白抗氧化性影响研究[J]. 中国食物与营养, 2017, 23(10): 63-67.
- [4] 张志颖, 张琳璐, 白英, 等. 亚麻籽胶-乳清蛋白改性物的制备及抗氧化性[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(1): 146-153.
- [5] 胡晓, 刘晶, 高颖, 等. 裂壶藻蛋白肽美拉德反应产物的制备及其抗氧化特性[J]. 南方水产科学, 2021, 17(4): 58-65.
- [6] 赵玉滨, 穆秋霞, 曲柳青, 等. 糖基化改性对酪蛋白酶解产物抗氧化活性的影响[J]. 食品与机械, 2019, 35(10): 223-231.
- [7] 曾祺, 郑安娜, 张志国. 麦胚蛋白的提取及其酶解制备多肽工艺参数优化[J]. 粮食与油脂, 2019, 32(6): 20-24.
- [8] 顾婕, 马海乐, 何荣海, 等. 响应面法优化小麦胚芽蛋白逆流脉冲超声辅助提取技术[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(8): 19-23.

- GU J, MA H L, HE R H, et al. Optimization of countercurrent pulsed ultrasound-assisted extraction of wheat germ protein by response surface method[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2015, 30(8): 19-23.
- [9] 武文佳. 小麦胚芽蛋白的免疫活性评价及球蛋白免疫活性肽的结构鉴定与机理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017: 38-56.
- WU W J. Evaluation of immunomodulating activity in wheat germ protein, characterization and mechanism of immunomodulatory peptide in globulin [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017: 38-56.
- [10] 王琪. 小麦胚芽蛋白的酶解及其产物抗氧化活性研究[D]. 武汉: 武汉工业学院, 2012: 39-46.
- WANG Q. Study on wheat germ hydrolysis by enzyme and antioxidant activity of hydrolysates[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2012: 39-46.
- [11] 齐慧丽, 李书国. 小麦胚芽蛋白活性肽的酶法制备及抗氧化活性的研究[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(11): 41-59.
- QI H L, LI S G. Study on enzymatic preparation of wheat germ protein bioactive peptide and its antioxidant activity[J]. Cereals & Oils, 2021, 34(11): 41-59.
- [12] GUO Y, BAO Y H, CHAI Y Y. Preparation of microcapsule antioxidative wall materials of pine nut oil by the Maillard reaction[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2018, 99(6): 2 793-2 801.
- [13] 李天骄. 藜麦蛋白糖基化产物特性研究及其在高直链玉米淀粉膜中的应用[D]. 长春: 吉林农业大学, 2020: 11-12.
- LI T J. Study on the characterization of quinoa protein glycosylation product and its application in high amylose corn starch[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2020: 11-12.
- [14] 钱森和, 王洲, 魏明, 等. 美拉德反应对芝麻多肽抗氧化活性的影响[J]. 食品与机械, 2018, 34(8): 24-28, 88.
- QIAN S H, WANG Z, WEI M, et al. Study on the effect of Maillard reaction on antioxidant activity of sesame polypeptides[J]. Food & Machinery, 2018, 34(8): 24-28, 88.
- [15] AJANDOUZ E H, CHIAKPE L S, ORE F D, et al. Effects of pH on caramelization and Maillard reaction kinetics in fructose-lysine model systems[J]. Journal of Food Science, 2001, 66: 926-931.
- [16] CHURCH F C, SWAISGOOD H E, PORTER D H, et al. Spectrophotometric assay using ophthalaldehyde for determination of proteolysis in milk and isolated milk proteins[J]. Journal of Dairy Science, 1983, 66(6): 1 219-1 227.
- [17] JIANG Z, WANG L, WU W, et al. Biological activities and physicochemical properties of Maillard reaction products in sugar-bovine casein peptide model systems[J]. Food Chemistry, 2013, 141(4): 3 837-3 845.
- [18] YEN G C, DUH P D. Antioxidant properties of methanolic extracts from peanut hulls [J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 1993, 70: 383-386.
- [19] CHEVALIER F, CHOBERT J M, POPINEAU Y, et al. Improvement of functional properties of B-lactoglobulin glycosylated through the Maillard reaction is related to the nature of the sugar [J]. International Dairy Journal, 2001, 11(3): 145-152.
- [20] LI X L, TU X F, ZHANG Y S, et al. Effects of different chemical modifications on the antioxidant activities of polysaccharides sequentially extracted from peony seed dreg [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 112: 675-685.
- [21] 李灵诚. 大米蛋白糖基化接枝产物的制备及理化与功能特性研究[D]. 南宁: 广西大学, 2020.
- LI L C. Study on the preparation, physicochemical and functional properties of rice protein glycosylated products [D]. Nanning: Guangxi University, 2020.
- [22] FU Y, ZHAO X H. Utilization of chum salmon (*Oncorhynchus keta*) skin gelatin hydrolysates to attenuate hydrogen peroxide-induced oxidative injury in rat hepatocyte BRL cell model [J]. Journal of Aquatic Food Product Technology, 2015, 24(7): 648-660.
- [23] 夏琪娜. 超声预处理结合美拉德对酪蛋白及其酶解物抗氧化性影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019.
- XIA Q N. Effect of ultrasonic pretreatment combined with Maillard reaction on antioxidant activity of casein and its enzymatic hydrolysates [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019.
- [24] NOOSHKAM M, MADADLOU A. Maillard conjugation of lactulose with potentially bioactive peptides[J]. Food Chemistry, 2016, 192: 831-836.
- [25] 钟比真. 微波场中卵清蛋白糖基化反应不均匀性的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2021: 47.
- ZHONG B Z. Inhomogeneity of glycosylation of ovalbumin in microwave field[D]. Nanchang: Nanchang University, 2021: 47.
- [26] THAIPONG K, BOONPRAKOB U, CROSBY K, et al. Comparison of ABTS, DPPH, FRAP and ORAC as says for estimating antioxidant activity from guava fruit extracts[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2006, 19(6): 669-675.
- [27] 葛伟, 李晓东, 曲佳林, 等. 超声预处理对酪蛋白美拉德反应产物抗氧化性和结构的影响[J]. 中国食品学报, 2018, 18(2): 125-133.
- GE W, LI X D, QU J L, et al. Effect of ultrasonic pretreatment on the oxidation resistance and structure of casein Maillard reaction products[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2018, 18(2): 125-133.
- [28] 章银良, 张陆燕, 周文权, 等. 不同温度对酪蛋白-木糖模式美拉德反应产物抗氧化性的影响[J]. 现代食品科技, 2014, 30(4): 211-218.
- ZHANG Y L, ZHANG L Y, ZHOU W Q, et al. Effects of temperatures on the antioxidant activity of casein-xylose-model Maillard reaction products [J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(4): 211-218.
- [29] 袁照路. 大麦蛋白糖基化及抗氧化性研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2014: 18-28.
- YUAN Z L. Study on glycosylation and antioxidant activity of barley protein[D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2014: 18-28.