

# 模拟人胃肠仿生消化对花生肽亚铁抗氧化活性的影响

肖怀秋<sup>1,2</sup>, 李玉珍<sup>1</sup>, 赵谋明<sup>2</sup>, 林亲录<sup>3</sup>, 刘 军<sup>1</sup>, 周 全<sup>1</sup>, 姜明姣<sup>4</sup>

(1. 湖南化工职业技术学院 制药与生物工程学院, 湖南 株洲 412000; 2. 华南理工大学 食品科学与工程学院, 广州 510640; 3. 中南林业科技大学 食品科学与工程学院, 长沙 410004; 4. 湖南中威制药有限公司, 湖南 株洲 412000)

**摘要:**为探讨花生肽亚铁在模拟人胃肠仿生消化条件下抗氧化活性变化规律,研究了仿生消化过程中表面疏水性、DPPH·清除率、 $O_2^-$ ·清除率、·OH清除率、亚油酸氧化抑制活性和脂质过氧化抑制活性等指标变化。结果发现:模拟胃肠仿生消化后花生肽亚铁表面疏水性得到增强,仿生消化270 min时表面疏水性最大( $15.84 \pm 0.33$ )  $\mu\text{g}$ ;仿生消化增强了DPPH·清除活性,仿生消化300 min时,DPPH·清除率为( $88.77 \pm 1.00$ )%,显著高于1.0 mg/mL  $V_C$  ( $p < 0.05$ );胃肠仿生消化物 $O_2^-$ ·和·OH清除活性分别显著低于1.0 mg/mL  $V_C$ 和0.6 mg/mL  $V_C$ ;胃肠仿生消化物具有较好的亚油酸氧化抑制作用,小肠仿生消化物抑制活性最高;仿生消化可增强脂质过氧化的保护效果,仿生消化330 min(质量浓度20 mg/L)时,脂质过氧化抑制效果最好,但显著低于 $V_C$ 对脂质过氧化的抑制作用( $p < 0.05$ )。试验结果表明,胃肠仿生消化可不同程度地增强花生肽亚铁的抗氧化活性。

**关键词:**花生肽亚铁;胃肠仿生消化;活性氧自由基;亚油酸氧化;脂质过氧化

中图分类号:TS218; TS201.4 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2020)07-0050-07

## Effect of simulate human gastrointestinal biomimetic digestion on antioxidant ability of peanut peptide – ferrous

XIAO Huaiqiu<sup>1,2</sup>, LI Yuzhen<sup>1</sup>, ZHAO Mouming<sup>2</sup>, LIN Qinlu<sup>3</sup>,  
LIU Jun<sup>1</sup>, ZHOU Quan<sup>1</sup>, JIANG Mingjiao<sup>4</sup>

(1. School of Pharmaceutical and Bioengineering, Hunan Chemical Vocational Technology College, Zhuzhou 412000, Hunan, China; 2. College of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 3. College of Food Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China; 4. Hunan Zonwe Pharmaceutical Co., Ltd., Zhuzhou 412000, Hunan, China)

**Abstract:** To investigate the changing rule of antioxidant activity of peanut peptide – ferrous (PPF) during simulated human gastrointestinal digestion (SHGD), the surface hydrophobicity, DPPH· scavenging rate,  $O_2^-$ · scavenging rate, ·OH scavenging rate, linoleic acid oxidation inhibitory activity and lipid peroxidation inhibitory activity of PPF during SHGD were studied. The results showed that SHGD enhanced the surface hydrophobicity, and the surface hydrophobicity of ( $15.84 \pm 0.33$ )  $\mu\text{g}$  was the highest at 270 min. SHGD enhanced the DPPH· scavenging capacity, the DPPH· scavenging rate was ( $88.77 \pm 1.00$ )% at 300 min, which was significantly higher than that of 1.0 mg/mL  $V_C$ . The scavenging capacities on  $O_2^-$ · and ·OH of PPF gastrointestinal biomimetic digestive products were markedly weaker than that of 1.0 mg/mL  $V_C$  and 0.6 mg/mL  $V_C$ , respectively. The gastrointestinal biomimetic digestion product had better linoleic acid oxidation inhibition effect, and the intestinal biomimetic digestion products showed the highest in-

收稿日期:2019-10-02;修回日期:2020-02-22

基金项目:湖南省自然科学基金科教联合基金项目(2018JJ5022);湖南省教育厅科研项目(18C1356)

作者简介:肖怀秋(1981),男,副教授,硕士,主要从事生物活性多肽制备、多肽-金属配位螯合物生物活性等方面的研究工作(E-mail)xiaohuaiqiu@163.com。

通信作者:李玉珍,副教授(E-mail)yuzhenli@163.com。

ties on  $O_2^-$ · and ·OH of PPF gastrointestinal biomimetic digestive products were markedly weaker than that of 1.0 mg/mL  $V_C$  and 0.6 mg/mL  $V_C$ , respectively. The gastrointestinal biomimetic digestion product had better linoleic acid oxidation inhibition effect, and the intestinal biomimetic digestion products showed the highest in-

hibitory activity. Biomimetic digestion also enhanced the protection of lipid peroxidation, and the inhibition rate of lipid peroxidation was the highest at 330 min and 20 mg/L, which was significantly lower than that of  $V_c$ . The results indicated that SHGD enhanced the antioxidant activity of PPF.

**Key words:** peanut peptide - ferrous (PPF); gastrointestinal biomimetic digestion; reactive oxygen species (ROS); linoleic acid oxidation; liposome peroxidation

在食品复杂体系中,活性氧自由基(reactive oxygen species, ROS)过量生成会引起食品蛋白质和脂类体系氧化,从而影响食品营养价值甚至产生不良影响。食源性抗氧化肽是来源于食物蛋白质且具有抑制生物大分子过氧化或清除体内自由基活性,可直接作用于自由基或间接消耗易产生自由基的多肽物质,对稳定食品蛋白质和脂质体系具有很好的作用,是当前食品营养学与功能食品研究热点<sup>[1]</sup>。近些年,多肽金属螯合物作为一种新型多肽金属营养物,其抗氧化活性受到广泛关注。林慧敏等<sup>[2]</sup>以舟山低值鱼为原料制备多肽亚铁螯合物,发现该多肽亚铁能有效清除·OH、DPPH·和 $O_2^-$ ·;谢超等<sup>[3]</sup>研究了带鱼下脚料制备的4种多肽亚铁螯合物(CA,螯合后产生的沉淀物组分;CB,沉淀于50%无水乙醇中的组分;CC,悬浮于80%乙醇中组分;CD,沉淀于80%无水乙醇底部组分)抗氧化活性,发现CB抗氧化活性可达 $\alpha$ -生育酚活性的92%;Megias等<sup>[4]</sup>酶法制备了向日葵多肽螯合铜,发现其抗氧化活性与 $\beta$ -胡萝卜素相当;Chan等<sup>[5]</sup>制备的肌肽和锌螯合物可捕捉 $O_2^-$ ·及·OH,并能有效清除单线态氧;夏松养等<sup>[6]</sup>复合酶解制备的鱼类多肽钙螯合物抗氧化能力达到 $\alpha$ -生育酚的94%。目前,部分学者对花生肽抗氧化活性进行了研究<sup>[7]</sup>,但花生肽亚铁胃肠仿生消化研究鲜见<sup>[8]</sup>,胃肠仿生消化对其抗氧化生物学活性变化的影响规律也尚未清楚。本试验利用双酶三阶法模拟花生肽亚铁人胃肠消化,评价胃肠仿生消化对抗氧化活性的影响,为研究花生肽亚铁胃肠仿生消化过程抗氧化活性变化规律和开发花生肽亚铁抗氧化剂提供理论支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

花生肽亚铁(peanut peptide - ferrous, PPF),自制,制备方法见参考文献[9];胃蛋白酶(5 500 U/g)、胰蛋白酶(3 500 U/g),诺维信(中国)生物技术有限公司;其他试剂均为分析纯。

DK-98-11A型电热恒温水箱,天津市泰斯特仪器有限公司;UV-2500紫外可见分光光度计,

日本岛津公司;HERMLE Z323K冷冻离心机,德国Hermle公司。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 花生肽亚铁的人胃肠仿生消化过程

参考Cruz-Huerta等<sup>[10]</sup>方法并做修改。准确称取10.0 mg花生肽亚铁于1 000 mL胃仿生消化液中,( $37 \pm 0.5$ ) $^{\circ}\text{C}$ 、100 r/min胃仿生消化2 h,每间隔30 min取样15 mL于8 000 r/min离心20 min,上清液用于抗氧化活性分析,收集的上清液命名为胃仿生消化物(simulated gastro-digesting fractions, SGF),样品依次命名为SGF<sub>1</sub>~SGF<sub>4</sub>;用0.5 mol/L NaOH调pH至7.6终止胃仿生消化,用十二指肠仿生消化液于( $37 \pm 0.5$ ) $^{\circ}\text{C}$ 、50 r/min仿生消化1 h,每间隔30 min取样15 mL于8 000 r/min离心20 min,取上清液测定抗氧化活性,收集的上清液命名为十二指肠仿生消化物(simulated duodenum-digesting fractions, SDF),样品依次命名为SDF<sub>1</sub>~SDF<sub>2</sub>;调节pH至6.8,继续于( $37 \pm 0.5$ ) $^{\circ}\text{C}$ 、50 r/min小肠仿生消化3 h,每间隔30 min取样15 mL于8 000 r/min离心20 min,取上清液测定抗氧化活性,收集的上清液命名为小肠仿生消化物(simulated intestinal-digesting fractions, SIF),样品依次命名为SIF<sub>1</sub>~SIF<sub>6</sub>。胃肠仿生消化液参考《中国药典》配制<sup>[11]</sup>。

#### 1.2.2 表面疏水性的测定

准确移取10 mg/L花生肽亚铁或仿生消化物1 mL,加入200  $\mu\text{L}$  1 mg/mL溴酚蓝,以磷酸盐缓冲溶液为对照,于6 000  $\times g$ 离心15 min,取上清液稀释10倍,在595 nm下测定吸光值(A)。表面疏水性用溴酚蓝结合量表示<sup>[12]</sup>。

$$\text{溴酚蓝结合量}/\mu\text{g} = \frac{1\,000 \times (A_{\text{对}} - A_{\text{样}})}{A_{\text{对}}}$$

式中: $A_{\text{对}}$ 为对照的吸光值; $A_{\text{样}}$ 为样品的吸光值。

#### 1.2.3 DPPH·清除活性测定

取3只试管分别加入下述试剂:①10 mg/L花生肽亚铁或仿生消化物1.5 mL和1.5 mL DPPH溶液(0.1 mmol/L,溶于95%乙醇);②10 mg/L花生

肽亚铁或仿生消化物 1.5 mL 和 1.5 mL 95% 乙醇;  
③1.5 mL DPPH 溶液和 1.5 mL 蒸馏水。振荡混匀后在室温下避光静置 30 min, 4 000 r/min 离心 10 min, 取上清液于 517 nm 测定吸光值。3 个反应液的吸光值分别为  $A_1$ 、 $A_3$  和  $A_2$ 。按下式计算 DPPH · 清除率。

$$\text{DPPH} \cdot \text{清除率} = [1 - (A_1 - A_3)/A_2] \times 100\%$$

#### 1.2.4 $\text{O}_2^-$ · 清除活性测定

准确移取 10 mg/L 花生肽亚铁或仿生消化物 2.0 mL, 加入 0.1 mol/L pH 8.2 Tris - HCl 缓冲液 2.5 mL, 混匀后于 25 °C 保温 10 min, 随后加入 25 °C 预热的 3 mmol/L 邻苯三酚溶液 0.5 mL 并混匀, 每隔 30 s 于 320 nm 测定一次吸光值 ( $A_{320}$ ), 反应 4 min 结束。以 0.1 mol/L pH 8.2 Tris - HCl 缓冲液为空白调零, 对照组以等体积去离子水代替样品, 做吸光值随时间的变化曲线, 斜率为邻苯三酚自氧化速率 ( $S$ )<sup>[13]</sup>。按下式计算  $\text{O}_2^-$  · 清除率。

$$\text{O}_2^- \cdot \text{清除率} = (S_{\text{对照}} - S_{\text{样品}})/S_{\text{对照}} \times 100\%$$

式中:  $S_{\text{对照}}$  为对照组邻苯三酚自氧化速率,  $\Delta A/\text{min}$ ;  $S_{\text{样品}}$  为样品组邻苯三酚自氧化速率,  $\Delta A/\text{min}$ 。

#### 1.2.5 $\cdot\text{OH}$ 清除活性测定

准确移取 0.5 mL 0.75 mmol/L 邻二氮菲无水乙醇溶液于试管中, 依次加入 1 mL 0.15 mol/L 磷酸盐缓冲溶液 (pH 7.4) 和 0.5 mL 去离子水, 充分混匀后, 加入 0.5 mL 0.75 mmol/L  $\text{FeSO}_4$  溶液, 混匀后, 加入 0.5 mL 0.01% 双氧水作为损伤管, 于 37 °C 水浴 60 min 后于 536 nm 测定吸光值 ( $A_{\text{损}}$ ); 未损伤管以 0.5 mL 蒸馏水代替损伤管中 0.5 mL 双氧水, 于 536 nm 测定吸光值 ( $A_{\text{未}}$ ); 样品管以 0.5 mL 样品代替损伤管中 0.5 mL 蒸馏水, 于 536 nm 测定吸光值 ( $A_{\text{样}}$ )<sup>[13]</sup>。按下式计算  $\cdot\text{OH}$  清除率。

$$\cdot\text{OH} \text{ 清除率} = (A_{\text{样}} - A_{\text{损}})/(A_{\text{未}} - A_{\text{损}}) \times 100\%$$

#### 1.2.6 亚油酸氧化抑制活性测定

准确移取 10 mg/L 花生肽亚铁或仿生消化物 3.0 mL, 加入 2.0 mL 0.05 mol/L 亚油酸 - 乙醇溶液, 充分混匀, 用硅胶塞密封并于 60 °C 保温, 每 12 h 取反应液 0.1 mL, 加入 4.7 mL 75% 乙醇、0.1 mL 30% 硫氰酸铵和 0.1 mL 0.02 mol/L  $\text{FeSO}_4$  (3.5% HCl 溶液), 混合均匀, 5 min 后于 500 nm 测定吸光值 ( $A_{500}$ )<sup>[13]</sup>。

#### 1.2.7 脂质过氧化抑制活性测定

构建以卵黄脂蛋白为底物的脂质过氧化模型进行脂质过氧化抑制活性评价。样品管包括 1:25 稀释的卵黄悬液 (卵黄用等体积 pH 7.45、0.1 mol/L 磷酸盐缓冲溶液 (PBS) 配制, 4 °C 保存, 用前摇匀) 0.2 mL 花生肽亚铁或仿生消化物 1.0 mL, 用 PBS 补足至 2.0 mL; 对照管提前加入 0.5 mL 20% 三氯乙酸 (TCA) 溶液, 并加入除样液外其他试剂。将上述两管同时于 (37 ± 0.5) °C 保温 60 min, 取出后, 样品管加入 0.5 mL 20% TCA 溶液, 静置 15 min 后, 与对照管一并于 3 500 r/min 离心 10 min。分别取上清液 2.0 mL, 加入 0.8% 硫代巴比妥酸 (TBA) 溶液 1.0 mL, 加塞于 100 °C 水浴 20 min, 取出冷却至室温; 以空白管调零 (空白管以 2.0 mL PBS 代替), 于 532 nm 测定吸光值<sup>[14]</sup>。按下式计算脂质过氧化 (LPO) 抑制率。

$$\text{LPO 抑制率} = (A_{\text{对}} - A_{\text{样}})/A_{\text{对}} \times 100\%$$

式中:  $A_{\text{对}}$  为对照管的吸光值;  $A_{\text{样}}$  为样品管的吸光值。

#### 1.2.8 数据统计分析

试验结果表示为 " $\bar{x} \pm s$ " ( $n=3$ ), 采用 IBM SPSS Statistics 25 进行多重均值比较 (LSD 检验)。显著性水平  $p < 0.05$  为显著,  $p > 0.05$  为不显著。

## 2 结果与分析

2.1 胃肠仿生消化对花生肽亚铁表面疏水性的影响 (见表 1)

表 1 胃肠仿生消化对花生肽亚铁表面疏水性的影响

样品	消化时间/min	表面疏水性/ $\mu\text{g}$	样品	消化时间/min	表面疏水性/ $\mu\text{g}$
PPF	0	7.12 ± 0.58 <sup>a</sup>	SIF <sub>1</sub>	210	13.23 ± 0.60 <sup>d</sup>
SGF <sub>1</sub>	30	7.64 ± 0.64 <sup>a</sup>	SIF <sub>2</sub>	240	13.33 ± 0.42 <sup>d</sup>
SGF <sub>2</sub>	60	8.53 ± 0.52 <sup>b</sup>	SIF <sub>3</sub>	270	15.84 ± 0.33 <sup>e</sup>
SGF <sub>3</sub>	90	10.07 ± 0.55 <sup>c</sup>	SIF <sub>4</sub>	300	15.51 ± 0.29 <sup>e</sup>
SGF <sub>4</sub>	120	11.46 ± 0.41 <sup>d</sup>	SIF <sub>5</sub>	330	15.77 ± 0.55 <sup>e</sup>
SDF <sub>1</sub>	150	11.84 ± 0.30 <sup>d</sup>	SIF <sub>6</sub>	360	15.61 ± 0.19 <sup>e</sup>
SDF <sub>2</sub>	180	12.52 ± 0.33 <sup>d</sup>			

注: 相同字母表示差异不显著 ( $p > 0.05$ ), 不同字母表示差异显著 ( $p < 0.05$ )。下同。

由表 1 可以看出: 当胃仿生消化 30 min 时, 花生肽亚铁胃仿生消化物的表面疏水性与未仿生消化

的花生肽亚铁表面疏水性差异不显著, 胃仿生消化 120 min 时表面疏水性显著增加至 (11.46 ± 0.41)

$\mu\text{g}$ ;十二指肠仿生消化阶段表面疏水性增幅不显著;仿生消化 270 min 时,表面疏水性达到最大( $15.84 \pm 0.33 \mu\text{g}$ ),继续进行小肠仿生消化,表面疏水性变化不显著,说明仿生消化 270 min 时疏水

性基团已充分暴露。研究表明,多肽疏水基团暴露有利于发挥其抗氧化活性<sup>[15-16]</sup>。

2.2 胃肠仿生消化对花生肽亚铁 DPPH·清除活性的影响(见表 2)

表 2 胃肠仿生消化对花生肽亚铁 DPPH·清除活性的影响

样品	消化时间/min	清除率/%	样品	消化时间/min	清除率/%
PPF	0	78.73 $\pm$ 0.94 <sup>a</sup>	SIF <sub>3</sub>	270	87.94 $\pm$ 0.94 <sup>h</sup>
SGF <sub>1</sub>	30	79.63 $\pm$ 0.80 <sup>ab</sup>	SIF <sub>4</sub>	300	88.77 $\pm$ 1.00 <sup>h</sup>
SGF <sub>2</sub>	60	80.34 $\pm$ 0.43 <sup>bc</sup>	SIF <sub>5</sub>	330	87.12 $\pm$ 0.75 <sup>h</sup>
SGF <sub>3</sub>	90	81.49 $\pm$ 1.10 <sup>cd</sup>	SIF <sub>6</sub>	360	87.02 $\pm$ 0.86 <sup>h</sup>
SGF <sub>4</sub>	120	82.53 $\pm$ 1.18 <sup>de</sup>	0.2 mg/mL V <sub>C</sub>	-	72.24 $\pm$ 0.46 <sup>i</sup>
SDF <sub>1</sub>	150	83.04 $\pm$ 0.96 <sup>ef</sup>	0.4 mg/mL V <sub>C</sub>	-	73.50 $\pm$ 0.29 <sup>j</sup>
SDF <sub>2</sub>	180	83.56 $\pm$ 0.56 <sup>ef</sup>	0.6 mg/mL V <sub>C</sub>	-	73.64 $\pm$ 0.43 <sup>j</sup>
SIF <sub>1</sub>	210	85.21 $\pm$ 0.68 <sup>g</sup>	0.8 mg/mL V <sub>C</sub>	-	74.57 $\pm$ 0.28 <sup>j</sup>
SIF <sub>2</sub>	240	87.97 $\pm$ 0.81 <sup>h</sup>	1.0 mg/mL V <sub>C</sub>	-	75.43 $\pm$ 0.25 <sup>j</sup>

由表 2 可以看出:V<sub>C</sub> 质量浓度为 0.4 mg/mL 时 DPPH·清除率为(73.50  $\pm$  0.29)% ,V<sub>C</sub> 质量浓度继续增加,DPPH·清除率增加不显著;花生肽亚铁及其仿生消化物具有较好的 DPPH·清除活性,未仿生消化的花生肽亚铁 DPPH·清除率为(78.73  $\pm$  0.94)% ,胃仿生消化 120 min 时,DPPH·清除率显著增加到(82.53  $\pm$  1.18)% ,十二指肠仿生消化

DPPH·清除率变化不显著,小肠仿生消化 240 min 时,DPPH·清除率显著增加到(87.97  $\pm$  0.81)% ,进一步延长小肠仿生消化时间,DPPH·清除率不再显著性增加,其可能原因是 DPPH·是脂溶性自由基,疏水性较强的多肽常具有较高 DPPH·清除活性<sup>[15]</sup>。

2.3 胃肠仿生消化对花生肽亚铁 O<sub>2</sub><sup>-</sup>·清除活性的影响(见表 3)

表 3 胃肠仿生消化对花生肽亚铁 O<sub>2</sub><sup>-</sup>·清除活性的影响

样品	消化时间/min	清除率/%	样品	消化时间/min	清除率/%
PPF	0	62.60 $\pm$ 0.37 <sup>a</sup>	SIF <sub>3</sub>	270	75.51 $\pm$ 0.33 <sup>b</sup>
SGF <sub>1</sub>	30	65.71 $\pm$ 0.11 <sup>b</sup>	SIF <sub>4</sub>	300	78.49 $\pm$ 0.24 <sup>i</sup>
SGF <sub>2</sub>	60	66.37 $\pm$ 0.23 <sup>b</sup>	SIF <sub>5</sub>	330	78.43 $\pm$ 0.27 <sup>i</sup>
SGF <sub>3</sub>	90	67.43 $\pm$ 0.39 <sup>c</sup>	SIF <sub>6</sub>	360	77.69 $\pm$ 0.22 <sup>j</sup>
SGF <sub>4</sub>	120	68.93 $\pm$ 0.46 <sup>d</sup>	0.2 mg/mL V <sub>C</sub>	-	58.26 $\pm$ 0.58 <sup>k</sup>
SDF <sub>1</sub>	150	70.34 $\pm$ 0.40 <sup>e</sup>	0.4 mg/mL V <sub>C</sub>	-	68.93 $\pm$ 0.30 <sup>d</sup>
SDF <sub>2</sub>	180	70.87 $\pm$ 0.77 <sup>e</sup>	0.6 mg/mL V <sub>C</sub>	-	73.16 $\pm$ 0.58 <sup>f</sup>
SIF <sub>1</sub>	210	72.74 $\pm$ 0.77 <sup>f</sup>	0.8 mg/mL V <sub>C</sub>	-	75.59 $\pm$ 0.33 <sup>h</sup>
SIF <sub>2</sub>	240	74.46 $\pm$ 0.30 <sup>g</sup>	1.0 mg/mL V <sub>C</sub>	-	80.55 $\pm$ 0.24 <sup>l</sup>

由表 3 可以看出:随着 V<sub>C</sub> 质量浓度的增加,O<sub>2</sub><sup>-</sup>·清除活性也显著增加,V<sub>C</sub> 质量浓度为 1.0 mg/mL 时 O<sub>2</sub><sup>-</sup>·清除率达(80.55  $\pm$  0.24)% ;花生肽亚铁及其仿生消化物 O<sub>2</sub><sup>-</sup>·清除率弱于 1.0 mg/mL V<sub>C</sub>;未仿生消化的花生肽亚铁 O<sub>2</sub><sup>-</sup>·清除率为(62.60  $\pm$  0.37)% ,随着胃肠仿生消化的进行,O<sub>2</sub><sup>-</sup>·清除活性得到不同程度强化,胃仿生消化 120 min 时,O<sub>2</sub><sup>-</sup>·清除率达(68.93  $\pm$  0.46)% ;十二指肠仿生消化物抗氧化活性差异不显著;小肠仿生消化 270 min 时,O<sub>2</sub><sup>-</sup>·清除率达到(75.51  $\pm$  0.33)% ,与 0.8 mg/mL V<sub>C</sub> 的 O<sub>2</sub><sup>-</sup>·清除率(75.59  $\pm$  0.33)% 相当,差异不显著;小肠仿生消化 300 min 时,O<sub>2</sub><sup>-</sup>·清除率达到最大,继续进行仿生消化,O<sub>2</sub><sup>-</sup>·清除率稍有降低。

2.4 胃肠仿生消化对花生肽亚铁·OH 清除活性的影响(见表 4)

由表 4 可以看出:V<sub>C</sub> 质量浓度为 0.6 mg/mL 时,·OH 清除率达到(98.84  $\pm$  0.41)% ;未仿生消化的花生肽亚铁·OH 清除率为(65.94  $\pm$  0.45)% ,胃仿生消化 120 min,·OH 清除率显著上升至(72.36  $\pm$  0.66)% ,十二指肠仿生消化完成后,·OH 清除率提升到(78.64  $\pm$  0.52)% ,随后的小肠仿生消化进一步提升了消化物的·OH 清除率,仿生消化 300 min 时·OH 清除率显著增加到(83.13  $\pm$  0.52)% ,继续进行小肠仿生消化,·OH 清除率增幅不显著,相比 V<sub>C</sub>(0.6~1.0 mg/mL)对·OH 的清除效果,花生肽亚铁及其仿生消化物的·OH 清除能力较弱。

表4 胃肠仿生消化对花生肽亚铁·OH清除活性的影响

样品	消化时间/min	清除率/%	样品	消化时间/min	清除率/%
PPF	0	65.94 ± 0.45 <sup>a</sup>	SIF <sub>3</sub>	270	84.74 ± 0.62 <sup>i</sup>
SGF <sub>1</sub>	30	65.93 ± 0.28 <sup>a</sup>	SIF <sub>4</sub>	300	83.13 ± 0.52 <sup>j</sup>
SGF <sub>2</sub>	60	69.02 ± 0.26 <sup>b</sup>	SIF <sub>5</sub>	330	83.73 ± 0.64 <sup>j</sup>
SGF <sub>3</sub>	90	70.49 ± 0.30 <sup>c</sup>	SIF <sub>6</sub>	360	83.79 ± 0.56 <sup>j</sup>
SGF <sub>4</sub>	120	72.36 ± 0.66 <sup>d</sup>	0.2 mg/mL V <sub>C</sub>	-	14.66 ± 0.16 <sup>k</sup>
SDF <sub>1</sub>	150	76.36 ± 0.54 <sup>e</sup>	0.4 mg/mL V <sub>C</sub>	-	36.93 ± 0.27 <sup>l</sup>
SDF <sub>2</sub>	180	78.64 ± 0.52 <sup>f</sup>	0.6 mg/mL V <sub>C</sub>	-	98.84 ± 0.41 <sup>m</sup>
SIF <sub>1</sub>	210	80.75 ± 0.72 <sup>e</sup>	0.8 mg/mL V <sub>C</sub>	-	99.77 ± 0.22 <sup>n</sup>
SIF <sub>2</sub>	240	81.62 ± 0.53 <sup>b</sup>	1.0 mg/mL V <sub>C</sub>	-	99.80 ± 0.16 <sup>n</sup>

## 2.5 胃肠仿生消化对花生肽亚铁亚油酸氧化抑制活性的影响(见表5)

由表5可以看出,未添加任何抗氧化剂的亚油酸在60℃保温12~144 h过程中吸光值呈显著上升趋势,且吸光值( $y$ )与保温时间( $x$ )呈线性关系( $y = 0.0127x - 0.127, R^2_{\text{Adj}} = 0.9616$ )。花生肽亚铁及其仿生物对亚油酸氧化有不同程度的抑制效果,总体上小肠仿生消化物对亚油酸氧化抑制效果优于十二指肠仿生物,十二指肠仿生物优于胃仿生物和未仿生物的花生肽亚铁。如亚油酸保温48 h,胃仿生物消化120 min的产物可将 $A_{500}$

由(0.45 ± 0.03)显著降低至(0.25 ± 0.01),而十二指肠仿生物消化180 min和小肠仿生物消化360 min则分别降至(0.24 ± 0.01)和(0.17 ± 0.01);又如亚油酸保温120 h,未仿生物的花生肽亚铁 $A_{500}$ (1.46 ± 0.03)与对照组 $A_{500}$ (1.52 ± 0.07)差异不显著,但胃仿生物添加到亚油酸氧化体系后,可显著抑制亚油酸氧化仿生物消化120 min, $A_{500}$ 为(0.95 ± 0.02),十二指肠和小肠仿生物消化后仍可进一步显著抑制亚油酸氧化,主要缘于仿生物增强了消化物的表面疏水性<sup>[17]</sup>。

表5 胃肠仿生消化对花生肽亚铁亚油酸氧化抑制活性的影响

样品	保温不同时间的 $A_{500}$											
	12 h	24 h	36 h	48 h	60 h	72 h	84 h	96 h	108 h	120 h	132 h	144 h
CK	0.13 ± 0.02 <sup>a</sup>	0.28 ± 0.04 <sup>a</sup>	0.35 ± 0.03 <sup>a</sup>	0.45 ± 0.03 <sup>a</sup>	0.55 ± 0.04 <sup>a</sup>	0.59 ± 0.05 <sup>a</sup>	0.83 ± 0.02 <sup>a</sup>	1.03 ± 0.04 <sup>a</sup>	1.29 ± 0.05 <sup>a</sup>	1.52 ± 0.07 <sup>a</sup>	1.68 ± 0.04 <sup>a</sup>	1.67 ± 0.03 <sup>a</sup>
PPF	0.08 ± 0.01 <sup>b</sup>	0.22 ± 0.06 <sup>b</sup>	0.29 ± 0.01 <sup>b</sup>	0.42 ± 0.03 <sup>b</sup>	0.53 ± 0.02 <sup>b</sup>	0.58 ± 0.02 <sup>b</sup>	0.73 ± 0.02 <sup>b</sup>	0.98 ± 0.03 <sup>b</sup>	1.17 ± 0.01 <sup>b</sup>	1.46 ± 0.03 <sup>b</sup>	1.59 ± 0.02 <sup>b</sup>	1.59 ± 0.04 <sup>b</sup>
SGF <sub>1</sub>	0.06 ± 0.01 <sup>bc</sup>	0.10 ± 0.01 <sup>c</sup>	0.17 ± 0.01 <sup>c</sup>	0.27 ± 0.01 <sup>c</sup>	0.43 ± 0.01 <sup>b</sup>	0.54 ± 0.01 <sup>b</sup>	0.72 ± 0.01 <sup>b</sup>	0.85 ± 0.01 <sup>c</sup>	1.04 ± 0.02 <sup>c</sup>	1.34 ± 0.03 <sup>b</sup>	1.52 ± 0.01 <sup>c</sup>	1.55 ± 0.03 <sup>b</sup>
SGF <sub>2</sub>	0.06 ± 0.01 <sup>c</sup>	0.09 ± 0.01 <sup>cd</sup>	0.16 ± 0.01 <sup>cd</sup>	0.26 ± 0.01 <sup>cd</sup>	0.40 ± 0.01 <sup>c</sup>	0.53 ± 0.01 <sup>b</sup>	0.66 ± 0.01 <sup>c</sup>	0.78 ± 0.04 <sup>d</sup>	0.97 ± 0.01 <sup>d</sup>	1.24 ± 0.06 <sup>c</sup>	1.45 ± 0.04 <sup>d</sup>	1.46 ± 0.03 <sup>c</sup>
SGF <sub>3</sub>	0.05 ± 0.01 <sup>c</sup>	0.07 ± 0.01 <sup>d</sup>	0.15 ± 0.01 <sup>d</sup>	0.25 ± 0.01 <sup>c</sup>	0.38 ± 0.01 <sup>c</sup>	0.47 ± 0.01 <sup>c</sup>	0.64 ± 0.01 <sup>c</sup>	0.76 ± 0.01 <sup>d</sup>	0.85 ± 0.02 <sup>e</sup>	1.14 ± 0.03 <sup>d</sup>	1.32 ± 0.05 <sup>c</sup>	1.38 ± 0.01 <sup>d</sup>
SGF <sub>4</sub>	0.04 ± 0.01 <sup>cd</sup>	0.07 ± 0.01 <sup>d</sup>	0.14 ± 0.01 <sup>de</sup>	0.25 ± 0.01 <sup>c</sup>	0.34 ± 0.01 <sup>d</sup>	0.44 ± 0.01 <sup>c</sup>	0.61 ± 0.01 <sup>d</sup>	0.63 ± 0.03 <sup>e</sup>	0.78 ± 0.03 <sup>f</sup>	0.95 ± 0.02 <sup>e</sup>	1.25 ± 0.04 <sup>f</sup>	1.29 ± 0.04 <sup>e</sup>
SDF <sub>1</sub>	0.04 ± 0.01 <sup>d</sup>	0.07 ± 0.01 <sup>d</sup>	0.13 ± 0.01 <sup>e</sup>	0.25 ± 0.01 <sup>c</sup>	0.30 ± 0.02 <sup>e</sup>	0.41 ± 0.01 <sup>d</sup>	0.52 ± 0.01 <sup>e</sup>	0.55 ± 0.03 <sup>f</sup>	0.66 ± 0.03 <sup>f</sup>	0.80 ± 0.03 <sup>f</sup>	1.11 ± 0.03 <sup>f</sup>	1.16 ± 0.02 <sup>f</sup>
SDF <sub>2</sub>	0.03 ± 0.01 <sup>d</sup>	0.06 ± 0.01 <sup>d</sup>	0.13 ± 0.01 <sup>ef</sup>	0.24 ± 0.01 <sup>d</sup>	0.25 ± 0.01 <sup>f</sup>	0.36 ± 0.01 <sup>e</sup>	0.46 ± 0.01 <sup>f</sup>	0.49 ± 0.03 <sup>f</sup>	0.57 ± 0.02 <sup>h</sup>	0.72 ± 0.04 <sup>g</sup>	0.91 ± 0.03 <sup>h</sup>	1.01 ± 0.04 <sup>g</sup>
SIF <sub>1</sub>	0.03 ± 0.01 <sup>d</sup>	0.06 ± 0.01 <sup>d</sup>	0.11 ± 0.01 <sup>fg</sup>	0.23 ± 0.02 <sup>e</sup>	0.24 ± 0.01 <sup>f</sup>	0.32 ± 0.01 <sup>f</sup>	0.34 ± 0.03 <sup>g</sup>	0.46 ± 0.03 <sup>g</sup>	0.50 ± 0.02 <sup>i</sup>	0.64 ± 0.02 <sup>h</sup>	0.81 ± 0.03 <sup>i</sup>	0.82 ± 0.02 <sup>h</sup>
SIF <sub>2</sub>	0.03 ± 0.01 <sup>d</sup>	0.06 ± 0.01 <sup>d</sup>	0.11 ± 0.01 <sup>g</sup>	0.20 ± 0.01 <sup>f</sup>	0.21 ± 0.01 <sup>g</sup>	0.29 ± 0.01 <sup>g</sup>	0.28 ± 0.02 <sup>h</sup>	0.40 ± 0.02 <sup>h</sup>	0.42 ± 0.01 <sup>i</sup>	0.52 ± 0.05 <sup>i</sup>	0.61 ± 0.03 <sup>i</sup>	0.66 ± 0.05 <sup>i</sup>
SIF <sub>3</sub>	0.03 ± 0.01 <sup>d</sup>	0.07 ± 0.01 <sup>d</sup>	0.09 ± 0.01 <sup>h</sup>	0.20 ± 0.01 <sup>f</sup>	0.18 ± 0.01 <sup>g</sup>	0.26 ± 0.01 <sup>i</sup>	0.22 ± 0.02 <sup>i</sup>	0.33 ± 0.01 <sup>i</sup>	0.35 ± 0.03 <sup>k</sup>	0.26 ± 0.03 <sup>j</sup>	0.45 ± 0.04 <sup>k</sup>	0.47 ± 0.04 <sup>j</sup>
SIF <sub>4</sub>	0.03 ± 0.01 <sup>d</sup>	0.06 ± 0.01 <sup>d</sup>	0.08 ± 0.01 <sup>hi</sup>	0.18 ± 0.01 <sup>fg</sup>	0.15 ± 0.01 <sup>h</sup>	0.22 ± 0.01 <sup>j</sup>	0.17 ± 0.02 <sup>j</sup>	0.21 ± 0.02 <sup>j</sup>	0.29 ± 0.02 <sup>j</sup>	0.19 ± 0.03 <sup>k</sup>	0.27 ± 0.04 <sup>l</sup>	0.32 ± 0.04 <sup>k</sup>
SIF <sub>5</sub>	0.03 ± 0.01 <sup>d</sup>	0.05 ± 0.01 <sup>e</sup>	0.07 ± 0.01 <sup>hi</sup>	0.18 ± 0.01 <sup>g</sup>	0.13 ± 0.01 <sup>h</sup>	0.20 ± 0.01 <sup>k</sup>	0.13 ± 0.01 <sup>k</sup>	0.15 ± 0.02 <sup>k</sup>	0.24 ± 0.02 <sup>m</sup>	0.15 ± 0.02 <sup>kl</sup>	0.17 ± 0.02 <sup>m</sup>	0.27 ± 0.04 <sup>k</sup>
SIF <sub>6</sub>	0.03 ± 0.01 <sup>d</sup>	0.04 ± 0.01 <sup>e</sup>	0.07 ± 0.01 <sup>i</sup>	0.17 ± 0.01 <sup>g</sup>	0.13 ± 0.01 <sup>h</sup>	0.18 ± 0.01 <sup>k</sup>	0.14 ± 0.01 <sup>k</sup>	0.14 ± 0.01 <sup>k</sup>	0.16 ± 0.02 <sup>n</sup>	0.11 ± 0.03 <sup>l</sup>	0.15 ± 0.01 <sup>m</sup>	0.22 ± 0.03 <sup>l</sup>

注:CK为亚油酸;不同小写字母表示同列间比较具有显著差异( $p < 0.05$ ),相同小写字母表示同列间比较不具有显著差异( $p > 0.05$ ),下同。

## 2.6 胃肠仿生消化对花生肽亚铁脂质过氧化抑制活性的影响(见表6)

由表6可以看出,仿生物对脂质过氧化保护作用以小肠仿生物消化300~330 min的产物保护效果较好,主要原因是由于多肽链存在疏水基团,在溶液中可通过疏水作用形成多聚体,增加对脂质体的

亲和力,提高稳定性<sup>[18]</sup>。随着仿生物的进行,疏水氨基酸暴露,疏水值增加,也增强了仿生物脂溶性,有利于对脂质过氧化的保护<sup>[19]</sup>。但疏水性不能过高,否则可能增加多肽金属螯合物的溶血活性<sup>[19]</sup>。由表6还可看出, $V_C$ 脂质过氧化抑制率( $y$ )与质量浓度( $x$ )呈非线性正相关关系( $y = 80.07 +$

1.27x - 0.03x<sup>2</sup>, R<sup>2</sup><sub>Adj</sub> = 0.975 9)。花生肽亚铁及其仿生消化物量效关系也均呈非线性正相关关系。仿生消化 330 min、质量浓度为 20 mg/L 时,脂质过氧

化抑制率最高,为(62.87 ± 0.88)% ,该条件下脂质过氧化抑制率低于 V<sub>C</sub>。

表6 胃肠仿生消化对花生肽亚铁脂质过氧化抑制活性的影响

样品	脂质过氧化抑制率/%						拟合曲线	R <sup>2</sup> <sub>Adj</sub>
	1 mg/L	2 mg/L	5 mg/L	8 mg/L	10 mg/L	20 mg/L		
V <sub>C</sub>	80.73 ± 0.48 <sup>a</sup>	83.35 ± 0.42 <sup>a</sup>	85.39 ± 0.31 <sup>a</sup>	87.82 ± 0.29 <sup>a</sup>	89.82 ± 0.37 <sup>a</sup>	92.44 ± 0.36 <sup>a</sup>	y = 80.07 + 1.27x - 0.03x <sup>2</sup>	0.975 9
PPF	15.81 ± 0.41 <sup>b</sup>	18.63 ± 0.43 <sup>b</sup>	26.97 ± 0.72 <sup>b</sup>	48.60 ± 0.33 <sup>b</sup>	50.70 ± 0.31 <sup>b</sup>	52.96 ± 0.42 <sup>b</sup>	y = 7.20 + 6.25x - 0.20x <sup>2</sup>	0.923 9
SGF <sub>1</sub>	16.52 ± 0.30 <sup>c</sup>	20.09 ± 0.75 <sup>c</sup>	29.56 ± 0.23 <sup>c</sup>	49.49 ± 0.13 <sup>c</sup>	51.55 ± 0.28 <sup>c</sup>	53.44 ± 0.22 <sup>b</sup>	y = 8.45 + 6.30x - 0.20x <sup>2</sup>	0.946 0
SGF <sub>2</sub>	24.48 ± 0.31 <sup>d</sup>	25.74 ± 0.53 <sup>d</sup>	31.58 ± 0.28 <sup>d</sup>	49.60 ± 0.32 <sup>c</sup>	51.24 ± 0.12 <sup>b</sup>	54.07 ± 0.28 <sup>c</sup>	y = 17.31 + 4.76x - 0.15x <sup>2</sup>	0.901 8
SGF <sub>3</sub>	27.16 ± 0.30 <sup>e</sup>	28.24 ± 0.52 <sup>e</sup>	32.55 ± 0.25 <sup>e</sup>	50.52 ± 0.29 <sup>d</sup>	52.14 ± 0.28 <sup>c</sup>	55.44 ± 0.17 <sup>d</sup>	y = 20.33 + 4.37x - 0.13x <sup>2</sup>	0.879 4
SGF <sub>4</sub>	28.50 ± 0.28 <sup>f</sup>	29.65 ± 0.32 <sup>f</sup>	34.49 ± 0.33 <sup>f</sup>	51.47 ± 0.24 <sup>e</sup>	53.69 ± 0.10 <sup>d</sup>	58.61 ± 0.27 <sup>e</sup>	y = 21.93 + 4.28x - 0.12x <sup>2</sup>	0.905 6
SDF <sub>1</sub>	30.65 ± 0.21 <sup>g</sup>	34.88 ± 0.31 <sup>g</sup>	36.77 ± 0.28 <sup>g</sup>	51.64 ± 0.19 <sup>e</sup>	53.55 ± 0.36 <sup>d</sup>	59.45 ± 0.20 <sup>f</sup>	y = 26.53 + 3.58x - 0.10x <sup>2</sup>	0.909 2
SDF <sub>2</sub>	33.09 ± 0.62 <sup>h</sup>	36.57 ± 0.29 <sup>h</sup>	38.49 ± 0.20 <sup>h</sup>	52.49 ± 0.33 <sup>f</sup>	53.79 ± 0.25 <sup>d</sup>	61.87 ± 0.26 <sup>g</sup>	y = 29.31 + 3.17x - 0.08x <sup>2</sup>	0.919 5
SIF <sub>1</sub>	34.54 ± 0.34 <sup>i</sup>	39.85 ± 0.35 <sup>i</sup>	43.61 ± 0.19 <sup>i</sup>	52.84 ± 0.35 <sup>f</sup>	56.73 ± 0.17 <sup>e</sup>	61.98 ± 0.15 <sup>gh</sup>	y = 31.85 + 3.28x - 0.09x <sup>2</sup>	0.969 1
SIF <sub>2</sub>	37.70 ± 0.20 <sup>j</sup>	41.60 ± 0.34 <sup>j</sup>	44.87 ± 0.24 <sup>j</sup>	53.54 ± 0.24 <sup>g</sup>	57.50 ± 0.30 <sup>f</sup>	62.22 ± 0.04 <sup>gh</sup>	y = 34.82 + 2.91x - 0.08x <sup>2</sup>	0.964 3
SIF <sub>3</sub>	39.40 ± 0.33 <sup>k</sup>	43.25 ± 0.27 <sup>k</sup>	46.83 ± 0.58 <sup>k</sup>	53.61 ± 0.27 <sup>g</sup>	58.47 ± 0.27 <sup>g</sup>	62.31 ± 0.39 <sup>gi</sup>	y = 36.84 + 2.72x - 0.07x <sup>2</sup>	0.968 3
SIF <sub>4</sub>	40.83 ± 0.23 <sup>l</sup>	45.64 ± 0.42 <sup>l</sup>	48.66 ± 0.43 <sup>l</sup>	57.22 ± 0.72 <sup>h</sup>	60.67 ± 0.34 <sup>h</sup>	62.61 ± 0.29 <sup>i</sup>	y = 38.21 + 3.06x - 0.09x <sup>2</sup>	0.954 3
SIF <sub>5</sub>	41.82 ± 0.46 <sup>m</sup>	46.44 ± 0.36 <sup>m</sup>	49.77 ± 0.60 <sup>m</sup>	57.70 ± 0.29 <sup>h</sup>	61.10 ± 0.90 <sup>h</sup>	62.87 ± 0.88 <sup>i</sup>	y = 39.28 + 2.99x - 0.09x <sup>2</sup>	0.961 8
SIF <sub>6</sub>	40.67 ± 0.38 <sup>l</sup>	45.83 ± 0.19 <sup>l</sup>	48.91 ± 0.31 <sup>l</sup>	56.86 ± 0.26 <sup>h</sup>	60.57 ± 0.33 <sup>h</sup>	61.85 ± 0.40 <sup>gi</sup>	y = 38.24 + 3.06x - 0.09x <sup>2</sup>	0.954 1

### 3 结论

胃肠仿生消化可增强花生肽亚铁表面疏水性,仿生消化 270 min 时表面疏水性达到最大;仿生消化还可增强花生肽亚铁 DPPH · 清除活性,仿生消化 300 min 时 DPPH · 清除率显著高于 1.0 mg/mL V<sub>C</sub> 的;花生肽亚铁仿生消化 300 min 时, O<sub>2</sub><sup>-</sup> · 清除率显著高于 0.8 mg/mL V<sub>C</sub> 的,但显著低于 1.0 mg/mL V<sub>C</sub> 的;花生肽亚铁仿生消化 360 min 时, · OH 清除率显著低于 0.6 mg/mL V<sub>C</sub> 的;仿生消化可增强产物对亚油酸氧化和脂质过氧化的抑制作用,小肠仿生消化物亚油酸氧化抑制活性最高,小肠仿生消化物也表现较好的脂质过氧化保护。试验表明,花生肽亚铁经胃肠仿生消化后,可增强其抗氧化活性,除作为亚铁营养补充剂外,还可作为一种潜在的高效抗氧化剂用于生物体的抗氧化、油脂氧化抑制和生物膜脂质过氧化保护。

### 参考文献:

[1] IWANIAK A, DAREWICZ M, MINKIEWICZ P. Peptides derived from foods as supportive diet components in the prevention of metabolic syndrome[J]. Compr Rev Food Sci Food Safety, 2018, 17(1): 63 - 81.  
 [2] 林慧敏,张宾,邓尚贵,等. 舟山海域 4 种低值鱼酶解蛋白亚铁螯合物自由基清除活性与抑菌活性研究[J]. 中国食品学报, 2012, 12(1): 19 - 24.  
 [3] 谢超,邓尚贵,霍健聪. 带鱼下脚料水解螯合物制备及其

功能活性研究[J]. 食品科技, 2009, 34(11): 91 - 96.  
 [4] MEGÍAS C, PEDROCHE J, YUST M, et al. Production of copper - chelating peptides after hydrolysis of sunflower proteins with pepsin and pancreatin[J]. LWT - Food Sci Technol, 2008, 41(10): 1973 - 1977.  
 [5] CHAN K M, DECKER E A. Endogenous skeletal muscle antioxidants[J]. Crit Rev Food Sci Nutr Res, 1994, 34(4): 403 - 426.  
 [6] 夏松养,谢超,霍建聪,等. 鱼蛋白酶水解物的钙螯合修饰及其功能活性[J]. 水产学报, 2008, 32(3): 471 - 477.  
 [7] NYO M K, NGUYEN L T. Value - addition of defatted peanut cake by proteolysis: effects of proteases and degree of hydrolysis on functional properties and antioxidant capacity of peptides[J]. Waste Biomass Valori, 2017, 10(5): 1251 - 1259.  
 [8] 肖怀秋,李玉珍,林亲录,等. 花生肽亚铁稳定性及胃肠仿生消化行为研究[J]. 中国油脂, 2019, 44(11): 29 - 33.  
 [9] 李玉珍,肖怀秋,赵谋明,等. 冷榨花生粕蛋白多肽 - 亚铁螯合物制备工艺优化及结构分析[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(4): 64 - 69.  
 [10] CRUZ - HUERTA E, GARCÍA N M J, MIRALLES B, et al. Caseinophosphopeptides released after tryptic hydrolysis versus simulated gastrointestinal digestion of a casein - derived by - product[J]. Food Chem, 2015, 168: 648 - 655.  
 [11] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典(第二部)[M]. 北京: 中国医药科技出版, 2010.

## 参考文献:

- [1] 杨湄,黄凤洪. 中国芝麻产业现状与存在问题、发展趋势与对策建议[J]. 中国油脂,2009,34(1): 7-12.
- [2] 王瑞元. 我国芝麻产业的发展[J]. 中国油脂,2016,41(2): 1-2.
- [3] KURIYAMA K I, TSUCHIYA K Y, MURI T. Analysis of lignan glycosides in sesame seed by high pressure liquid chromatography[J]. Nippon Nogei Kagaku Kaishi, 1993, 67(12): 1693-1700.
- [4] KATSUZAKI H, KAWAKISHI S, OSAWA T. Sesaminol glucosides in sesame seeds[J]. Phytochemistry, 1994, 35(3): 773-776.
- [5] SUJA K P, JAYALEKSHMY A, ARUMUGHAN C. Free radical scavenging behavior of antioxidant compounds of sesame (*Sesamum indicum* L.) in DPPH· system[J]. J Agric Food Chem, 2004, 52(4): 912-915.
- [6] MIYAKE Y, FUKUMOTO S, OKADA M, et al. Antioxidative catechol lignans converted from sesamin and sesaminol triglucoside by culturing with *Aspergillus* [J]. J Agric Food Chem, 2005, 53(1): 22-27.
- [7] PENG Z, XU Y Y, MENG Q R, et al. Preparation of sesaminol from sesaminol triglucoside by  $\beta$ -glucosidase and cellulose hydrolysis[J]. J Am Oil Chem Soc, 2016, 93(6): 765-772.
- [8] KANG M H, KAWAI Y, NAITO M, et al. Dietary defat-
- ted sesame flour decreases susceptibility to oxidative stress in hypercholesterolemic rabbits [J]. J Nutr, 1999, 129(10): 1885-1890.
- [9] ZHU X L, ZHANG X, SUN Y, et al. Purification and fermentation in vitro of sesaminol triglucoside from sesame cake by human intestinal microbiota [J]. J Agric Food Chem, 2013, 61(8): 1868-1877.
- [10] MOAZZAMI A A, ANDERSSON R E, KAMAL-ELDIN A. HPLC analysis of sesaminol glucosides in sesame seeds [J]. J Agric Food Chem, 2006, 54(3): 633-638.
- [11] 高锦鸿,梅鸿献,汪学德,等. 芝麻中芝麻素酚三糖苷超声辅助提取工艺研究[J]. 中国油脂,2016,41(2): 97-100.
- [12] 彭珍,孟庆然,徐亚元,等. 芝麻粕中芝麻素酚三糖苷高效液相色谱检测方法的建立[J]. 中国油脂,2016,41(7): 90-93.
- [13] 汪学德. 亚临界萃取芝麻脂溶性和水溶性木酚素及其生物活性研究[D]. 广州:广东工业大学,2016.
- [14] 易军鹏,朱文学,马海乐,等. 牡丹籽油超声辅助提取工艺的响应面法优化[J]. 农业机械学报,2009,40(6): 103-110.
- [15] 朱秀灵,戴清源,王枫,等. 处理条件对芝麻素酚三糖苷稳定性的影响[J]. 食品与机械,2019,35(6): 30-35.
- [16] 彭珍. 芝麻粕中芝麻素酚三糖苷的提取及转化研究[D]. 江苏 无锡:江南大学,2016.
- (上接第55页)
- [12] PASDAR N A, CHAN E C L I. Comparison of protein surface hydrophobicity measured at various pH values using three different fluorescent probes[J]. J Agric Food Chem, 2000, 48(2): 328-334.
- [13] 杨梅琳. 蚕蛹蛋白的酶法水解及其产物的抗氧化性研究[D]. 江苏 无锡:江南大学,2006.
- [14] 张尔贤,俞丽君,周意琳,等.  $Fe^{2+}$  诱发脂蛋白 PUFA 过氧化体系及对若干天然产物抗氧化作用的评价[J]. 生物化学与生物物理学报, 1996, 28(2): 218-222.
- [15] XIE N, WANG B, JIANG L, et al. Hydrophobicity exerts different effects on bioavailability and stability of antioxidant peptide fractions from casein during simulated gastrointestinal digestion and Caco-2 cell absorption[J]. Food Res Int, 2015, 76: 518-526.
- [16] WANG C, LI B, WANG B, et al. Degradation and antioxidant activities of peptides and zinc-peptide complexes during in vitro gastrointestinal digestion [J]. Food Chem, 2015, 173: 733-740.
- [17] 张会翠,唐琳,杨庆利,等. 超滤法分离花生肽及其抗氧化活性的研究[J]. 花生学报, 2012, 41(1): 1-5.
- [18] CASTRO R J S D, SATO H H. Comparison and synergistic effects of intact proteins and their hydrolysates on the functional properties and antioxidant activities in a simultaneous process of enzymatic hydrolysis [J]. Food Bioprod Process, 2014, 92(1): 80-88.
- [19] PATHAK N, SALAS-AUVERT R, RUCHE G, et al. Comparison of the effects of hydrophobicity, amphiphilicity, and  $\alpha$ -helicity on the activities of antimicrobial peptides [J]. Proteins Struct Funct Bioinform, 2010, 22(2): 182-186.