

鸡血球肽螯合铁的结构表征及其稳定性研究

石 景, 邹 烨, 马晶晶, 杨 彪, 王道营, 徐为民, 杨 静

Structural Characterization and Stability Study of Iron-Chelating Peptides from Chicken Blood

SHI Jing, ZOU Ye, MA Jingjing, YANG Biao, WANG Daoying, XU Weimin, and YANG Jing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022120119>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

鱼胶原蛋白肽对 α -乳白蛋白和表没食子儿茶素没食子酸酯聚集行为的影响及所形成三元复合物的热稳定性

Inhibition of the Aggregation of α -Lactalbumin and(-)-Epigallocatechin Gallate in the Presence of Collagen Peptide and the Thermal Stability of the Ternary Complexes Formed

食品工业科技. 2018, 39(14): 55-60 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.14.011>

含酪氨酸残基的食源性ACE抑制二肽的稳定性研究

Stability of Food-derived ACE Inhibitory Dipeptides Containing Tyrosine Residue

食品工业科技. 2019, 40(18): 282-288 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.18.046>

鲨鱼单域抗体-碱性磷酸酶融合蛋白的表达及热稳定性分析

Expression and Thermal Stability Analysis of Shark Single Domain Antibody-Alkaline Phosphatase Fusion Protein

食品工业科技. 2020, 41(21): 110-115 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020020051>

热稳定性高 β -甘露聚糖酶产生菌的筛选、鉴定及酶学性质研究

Isolation, Identification and Enzyme Properties of a β -Mannanase Producing Strain with High Thermal Stability

食品工业科技. 2020, 41(19): 127-131 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.19.020>

辣椒生物碱的活性与利用度改进技术研究进展

Recent Advances in Bioactivities and Technologies for Bioavailability Improvement of Capsicum Alkaloids

食品工业科技. 2021, 42(15): 412-419 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020070406>

类胡萝卜素肠道吸收及生物利用度研究进展

Research Progress on Intestinal Absorption and Bioavailability of Carotenoids

食品工业科技. 2021, 42(15): 403-411 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020070335>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

石景, 邹烨, 马晶晶, 等. 鸡血球肽螯合铁的结构表征及其稳定性研究 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(19): 427–432. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022120119

SHI Jing, ZOU Ye, MA Jingjing, et al. Structural Characterization and Stability Study of Iron-Chelating Peptides from Chicken Blood[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(19): 427–432. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022120119

· 营养与保健 ·

鸡血球肽螯合铁的结构表征及其稳定性研究

石 景^{1,2,3}, 邹 烨^{2,3,4}, 马晶晶^{2,3,4}, 杨 麒^{1,2,3,4}, 王道营^{2,3,4}, 徐为民^{1,2,3,4,*}, 杨 静^{2,3,4,*}

(1.南京农业大学食品科技学院, 江苏南京 210095;

2.省部共建国家重点实验室培育基地江苏省食品质量安全重点实验室, 江苏南京 210014;

3.江苏省农业科学院农产品加工研究所, 江苏南京 210014;

4.农业农村部农产品冷链物流技术重点实验室, 江苏南京 210014)

摘要:为了评估鸡血用于膳食铁补充剂的潜力, 本文以鸡血和氯化亚铁为原料制备了鸡血球肽螯合铁, 采用扫描电镜及差示扫描量热对其结构进行表征, 分析了其在不同温度(30~80 °C)及pH(2~9)下的稳定性, 并对体外稳定性进行了探讨。结果表明鸡血球肽和铁结合生成一种新的肽铁螯合物。该螯合物具有良好的热稳定性(铁保留率73.76%以上)并耐酸碱。经体外模拟消化发现, 鸡血球肽螯合铁的消化稳定性(铁保留率为86.01%)优于硫酸亚铁和葡萄糖酸亚铁。此外, 在1%植酸、1%草酸和8%膳食纤维这三种膳食因素的影响下, 鸡血球肽螯合铁显示出比硫酸亚铁和葡萄糖酸亚铁更好的生物可及性。

关键词:鸡血球肽螯合, 热稳定性, 体外模拟消化, 生物利用度

中图分类号:TS251

文献标识码:A

文章编号:1002-0306(2023)19-0427-06

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022120119

本文网刊:



Structural Characterization and Stability Study of Iron-Chelating Peptides from Chicken Blood

SHI Jing^{1,2,3}, ZOU Ye^{2,3,4}, MA Jingjing^{2,3,4}, YANG Biao^{1,2,3,4}, WANG Daoying^{2,3,4},
XU Weimin^{1,2,3,4,*}, YANG Jing^{2,3,4,*}

(1. College of Food Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China;

2. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Food Quality and Safety, A National Key Laboratory Training

Base Jointly Established by the Ministry and the Province, Nanjing 210014, China;

3. Institute of Agricultural Products Processing, Jiangsu Academy of Agricultural Science, Nanjing 210014, China;

4. Key Laboratory of Agricultural Products Cold Chain Logistics Technology, Ministry of
Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China)

Abstract: To evaluate the potential of chicken blood for dietary iron supplementation, chicken blood and ferrous chloride were used as raw materials to prepare iron-chelating peptides from chicken blood in this paper. The structure of iron-chelating peptides from chicken blood was characterized by scanning electron microscopy and differential scanning calorimetry. The stability of iron-chelating peptides from chicken blood was analyzed at different temperatures (30~80 °C) and pH (2~9), and its *in vitro* stability was also discussed. The study confirmed that it had good thermal stability (iron retention rate above 73.76%) and acid and alkali resistance. The digestive stability of iron-chelating peptides from chicken blood (iron retention of 86.01%) was found to be better than that of ferrous sulfate and ferrous gluconate by simulated digestion *in vitro*. In addition, under the influence of three dietary factors, namely 1% phytic acid, 1% oxalic acid, and 8%

收稿日期: 2022-12-14

基金项目: 江苏省自然科学基金青年科学基金项目 (BK20210160); 国家现代农业产业技术体系资助 (CARS-41)。

作者简介: 石景 (1997-), 女, 硕士, 研究方向: 禽肉品加工与质量研究, E-mail: yuyuss29@163.com。

* 通信作者: 徐为民 (1969-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 肉品加工与质量控制, E-mail: weiminxu2002@aliyun.com。

杨静 (1987-), 女, 博士, 助理研究员, 研究方向: 禽畜副产物加工与综合利用, E-mail: 20210007@jaas.ac.cn。

dietary fiber, iron-chelating peptides from chicken blood showed better bioaccessibility than ferrous sulfate and ferrous gluconate.

Key words: chicken blood peptide chelation; thermal stability; simulated digestion *in vitro*; bioavailability

我国是世界上畜禽资源最丰富的国家之一。近年来,我国鸡肉生产保持持续增长,鸡肉产量仅次于美国,位居世界第二位^[1]。鸡肉消费大大促进了鸡肉生产增长。但与此同时,鸡屠宰的过程中也会产生大量的副产品,如皮、骨、血等。鸡血通常用于动物饲料^[2],其附加值很低。但是其血球中富含蛋白质和血红蛋白铁^[3],具有很高的营养价值,也是生产多肽的良好来源^[4],可以应用于食品、医药等行业。

铁是一种重要的微量营养元素,在许多生理过程中发挥作用,如红细胞生成,循环系统的氧气输送和转移以及各种器官的抗氧化能力^[5]。膳食铁的吸收受到多种因素的限制,如膳食纤维,谷物和豆类中的植酸,以及茶叶和红酒中的多酚类物质(如单宁酸)^[6],这些饮食成分会与铁离子形成沉淀物,从而影响铁的吸收^[7]。强化食品中的铁,是解决长期缺铁问题的一个富有成本效益的方法^[8],目前首选的治疗方法是口服铁。硫酸亚铁、葡萄糖酸亚铁及其他铁盐作为营养强化剂^[9],已广泛用于治疗铁缺乏。但是它们易对胃肠造成刺激,生物利用率较低^[10]。肽铁螯合物以多肽中的共价键、氢键等作为铁结合配体,与亚铁离子契合形成。它因其稳定性高、能弥补铁盐普遍生物利用度较低的缺点等而引起广泛关注^[11]。

目前已有研究利用桃仁^[12]、羊骨^[13]、鳕鱼皮^[14]等作为肽源制备并表征了许多食源性肽铁螯合物,发现其可以提高铁的生物利用度。多肽铁螯合物作为营养补充剂,亟需研究其在胃肠消化及饮食成分共存情况下的生物利用率。因此本文旨在利用鸡血水解产物,制备鸡血球肽螯合铁,并对其稳定性和生物可及性进行研究。该研究对于鸡血资源利用及鸡血肽螯合铁营养强化剂的开发提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

鸡血球肽 本实验室自制;胃蛋白酶(100 U/mg)、胰蛋白酶(250 U/mg) 上海源叶生物技术有限公司;无水乙醇 国药集团化学试剂有限公司;DMEM 高糖培养基 美国 Hyclone 公司;胎牛血清 美国 Gibco 公司;MTT 美国 Sigma 公司;Caco-2 细胞 南京凯基生物科技有限公司;其他所用试剂均为分析纯。

PTX-FA210S 型电子天平 福州华志科学仪器有限公司;DF-101S 型数显集热式磁力搅拌器 上海易友仪器有限公司;TG16-WS 型台式高速离心机 湖南湘仪实验室仪器开发有限公司;PILot2-4LD 真空冷冻干燥机 北京博医康实验仪器有限公司;EVO-LS 10 扫描电子显微镜 德国蔡司公司;NexIon2000 电感耦合等离子体质谱仪 美国珀金埃尔默股份有限公司。

尔默股份有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 鸡血球肽螯合铁的制备 将新鲜抗凝鸡血除杂后,于 3000 r/min 离心 15 min, 收集沉淀并加入 5 倍体积的去离子水, 均质化处理 40 min 后, 3000 r/min 离心 10 min, 获得沉淀血细胞。参照 Yang 等^[15] 的方法并稍作修改, 对沉淀血细胞进行酶解, 酶解反应结束后于 3000 r/min 离心 10 min, 收集上清液, 获得鸡血球多肽, 冷冻干燥后收集鸡血球肽(CBP)粉末。根据杨静等^[16] 的方法, 将鸡血球肽粉末溶解在去离子水中(终浓度为 20 mg/mL), 置于 30 °C 的水浴中并调节 pH 至 5.1, 按质量比(5:1)加入 FeCl₂·4H₂O 水浴搅拌反应 33 min。反应结束立即加入 9 倍体积的无水乙醇中静置 4 h。随后, 4 °C 下以 10000 r/min 离心 10 min, 收集沉淀冻干得到鸡血球肽螯合铁(CBP-Fe), 其螯合率为 72.17%。

1.2.2 表征分析

1.2.2.1 扫描电镜 取适量的 CBP 和 CBP-Fe 样品, 经真空喷金处理后, 在扫描电镜下观察样品的微观结构。具体条件参数为放大倍率 1000, 电压 15 kV, 工作距离 6.5 mm。

1.2.2.2 差示扫描量热分析 用差示扫描量热仪对 CBP 和 CBP-Fe 进行差示扫描量热分析。将 3 mg 的冻干样品放在铝锅中。然后用压片机将铝制锅密封。在干燥氮气环境(N₂ 流速 50 mL/min)下, 按 10 °C/min 从 25 °C 升温到 300 °C 对样品进行加热扫描^[17]。

1.2.3 稳定性分析

1.2.3.1 热稳定性试验 将 CBP-Fe 溶解于超纯水中至浓度为 2 mg/mL, 在不同温度(30、40、50、60、70、80 °C)下分别加热 1 h 后加入乙醇静置 4 h, 随后反应液在 8000 r/min 下离心 10 min, 取上清液^[18]。CBP-Fe 的热稳定性以铁保留率表示, 计算方法如下:

$$\text{铁保留率}(\%) = \frac{A - A_0}{A} \times 100$$

式中: A 代表样品中的总铁含量(mg); A₀ 代表上清液中的铁含量(mg)。

1.2.3.2 酸碱稳定性试验 将 CBP-Fe 溶解在超纯水中至浓度为 2 mg/mL, 在 37 °C 下不同 pH(2、3、4、5、6、7、8、9)中反应 1 h, 接着加入乙醇静置 4 h 并将反应液在 8000 r/min 下离心 10 min, 取上清液^[18] 测铁离子含量。CBP-Fe 的酸碱稳定性以铁保留率表示, 计算方法同 1.2.3.1 中的公式。

1.2.4 Caco-2 细胞活力试验 将 Caco-2 细胞置于

DMEM 培养基(含有 10% 胎牛血、1% 非必需氨基酸及 1% 双抗), 在 37 °C、5%CO₂ 恒温培养箱中培养。在细胞覆盖率达 80% 时, 用胰蛋白酶-EDTA 消化液分散细胞, 进行传代。参考 Cai 等^[19] 的方法, 选取第 23 代对数生长期细胞, 将其以每孔 5×10⁴ 个细胞的密度接种在 96 孔板中, 并在 37 °C、5% CO₂ 恒温培养箱中继续培养。24 h 后, 分别加入不同浓度的 CBP-Fe 溶液继续培养 24 h。接着向每个孔注入 20 μL MTT 培养 2 h, 随后加入 150 μL 的二甲基亚砜立即振荡 10 min 后, 使用酶标仪检测其在 490 nm 波长下的吸光值, 按照如下公式计算细胞的相对活力(%):

$$\text{细胞的相对活力}(\%) = \frac{A_s - A_b}{A_c - A_b} \times 100$$

式中: A_s 代表样品处理的吸光度值, A_b 代表无细胞的吸光度值, A_c 代表无样品处理的吸光度值。

1.2.5 体外模拟消化 参考 Wu 等^[20] 的方法, 模拟 CBP-Fe 分别在胃、肠及胃肠的消化, 并计算其在消化过程中的稳定性, 计算公式同 1.2.3.1。同时该试验以硫酸亚铁和葡萄糖酸亚铁作为对照。

1.2.5.1 体外模拟胃消化 将样品溶液(2.5 mg/mL)的 pH 调至 2, 加入 2%(w/w)胃蛋白酶, 在 37 °C 下水浴反应 2 h 后, 立即于 100 °C 加热 10 min。接着加入乙醇静置 2 h 后离心, 测定上清液中的铁含量。

1.2.5.2 体外模拟肠消化 样品溶液(2.5 mg/mL)的 pH 调至 7.6, 并加入 2%(w/w)胰蛋白酶。37 °C 下水浴反应 2 h 后, 反应液在 100 °C 加热 10 min。然后加入乙醇静置 2 h 并将其离心, 测定上清液中的铁含量。

1.2.5.3 体外模拟肠道消化 将样品溶液(2.5 mg/mL)的 pH 调至 2, 并加入 2%(w/w)胃蛋白酶, 然后在 37 °C 下水浴反应 2 h。随后将反应液 pH 调至 7.6, 加入 2%(w/w)的胰蛋白酶继续水浴反应 2 h。100 °C 下加热 10 min, 终止反应^[21]。加入乙醇静置 2 h 后将反应液离心, 测定其上清液中的铁含量。

1.2.6 模拟消化过程中不同膳食成分对鸡血球肽螯合铁的影响 分别称取一定量 CBP-Fe、葡萄糖酸亚铁和硫酸亚铁溶解在超纯水中(Fe²⁺含量为 1.2 mg/mL)。溶液在 37 °C 水浴中预热后, pH 调至 2, 加入 1% 草酸溶液。接着加入 3% 的胃蛋白酶(w/w)反应 2 h, 用 1.0 mol/L NaOH 将溶液的 pH 调整到 7.6, 加入 3% 的胰蛋白酶(w/w)继续反应 2 h。然后于 100 °C 下加热 10 min, 在 4500 r/min 下离心 10 min, 测定上清液中的铁含量^[22]。此外, 各加入 1% 植酸溶液和 8% 膳食纤维, 重复上述操作进行。可溶性铁含量用以下公式计算:

$$\text{可溶性铁含量}(\%) = \frac{S}{C} \times 100$$

式中: S 是上清液中的铁含量(mg); C 是样品中

的总铁含量(mg)。

1.3 数据处理

所有实验均重复三次。采用 SPSS 25.0 版的方差分析(Analysis of Variance)对数据进行分析, 并进行独立样本 T 检验和 Duncan's 多重范围检验以确定统计学意义(*P*<0.05)。

2 结果与分析

2.1 鸡血球肽及其铁螯合物的微观结构

利用 SEM 对鸡血球肽及其铁螯合物的微观结构进行了研究。从图 1 可以看到, 图 1A 中鸡血球肽呈现出表面较为平滑、疏松的板状结构。图 1B 中鸡血球肽螯合铁的表面则呈现出较为绵密的状态, 并聚集了一些突起的颗粒。陈嘉琪等^[23] 也发现了类似的结果, 其制备的羊骨多肽亚铁螯合物在微观结构下, 表面松散粗糙, 同时附有大密度颗粒。

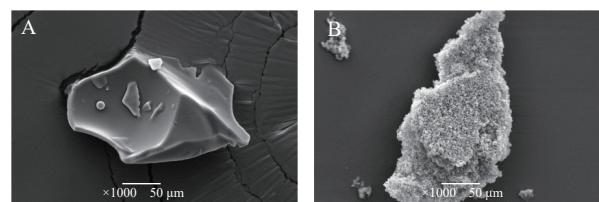


图 1 鸡血球肽(A)与鸡血球肽螯合铁(B)的扫描电镜图
Fig.1 Scanning electron micrographs of chicken blood peptide (A) and iron chelated chicken blood peptide (B)

SEM 结果表明多肽与亚铁在螯合反应后结构发生了变化。它们之间存在差异的主要原因可能是多肽与亚铁离子通过离子键和配位键发生了相互作用^[18]。此外, 鸡血球肽螯合铁表面附着的小颗粒聚集体, 可能是吸附在上面的亚铁晶体^[23]。因此, 多肽与亚铁离子之间可能还存在着一定的吸附作用。

2.2 差示扫描量热分析

差示扫描量热法是一种热分析技术, 可以测量物质在受热过程中其能量差与温度的关系, 已广泛应用于分析蛋白质的热稳定性和构象上。图 2 为鸡血球肽(CBP)和鸡血球肽螯合铁(CBP-Fe)的差示扫描量热分析图谱, 表 1 总结了 CBP 和 CBP-Fe 的峰值变性温度及熔融焓(ΔH)。图中结果所示 CBP 和 CBP-Fe 都为吸热转变。CBP 的吸热峰出现在 81.97 °C 和 135.34 °C, 键能为 15.13 J/g 和 45.37 J/g, CBP-Fe 的吸热峰右移, 依次出现在 100.16 °C 和 217.49 °C, 键能则为 224.69 J/g 和 29.58 J/g。两者之间的明显

表 1 鸡血球肽和鸡血球肽螯合铁的熔融焓和变性温度

Table 1 Enthalpy of fusion and denaturation temperature and of chicken blood peptide and iron chelated chicken blood peptide

样品	峰1		峰2	
	变性温度(°C)	ΔH(J/g)	变性温度(°C)	ΔH(J/g)
CBP	81.97±5.67 ^a	15.13±9.016 ^a	135.34±1.802 ^a	45.37±5.011 ^b
CBP-Fe	100.16±7.342 ^b	224.69±8.823 ^b	217.49±6.184 ^b	29.58±5.945 ^b

注: 表中数据表示为平均值±标准差, 同一列中上标不同字母表示差异显著性(*P*<0.05)。

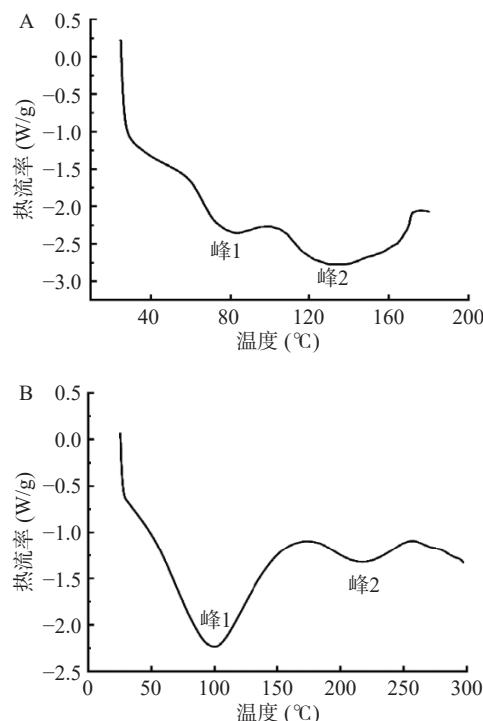


图 2 鸡血球肽(A)与鸡血球肽螯合铁(B)的差示扫描量热图

Fig.2 DSC of chicken blood peptide (A) and iron chelated chicken blood peptide (B)

差异可能是源于鸡血球肽与铁离子之间发生了螯合^[24], 融合物具有更加紧密的的结构, 比鸡血球肽更加稳定。因此化学键断裂所需的能量更大, 断裂温度也升高。

2.3 CBP-Fe 的热稳定性分析

由图 3 可知, 鸡血球肽螯合铁在 30 °C 时具有最高的铁保留率(84.01%)。随着温度的升高, 铁的保留率逐渐下降。这可能是由于铁离子和肽之间的配位键在高温下断裂导致 CBP-Fe 分解。当温度升高至 80 °C 时, 铁保留率为 73.76%。温度从 30 °C 升至 80 °C, CBP-Fe 稳定性变化相对稳定。这一趋势与之前 Shilpashree 等^[25] 制备铁结合的浓缩乳清蛋白复合物中得到的结果一致。总的来说, 铁的保留率可以保持在 70% 到 85% 之间, 表明当鸡血球肽螯合铁在 30~80 °C 温度范围内热加工处理时, 具有良好的热稳定性。

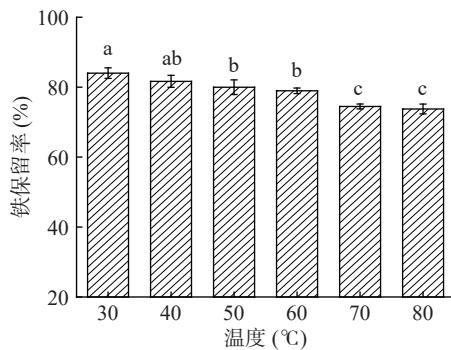


图 3 CBP-Fe 在不同温度下的铁保留率

Fig.3 Iron retention rate of CBP-Fe at different temperatures
注: 图中不同字母表示差异显著性($P<0.05$), 图 4 图 5 同。

2.4 CBP-Fe 的酸碱稳定性分析

图 4 所示为鸡血球肽螯合铁在不同 pH 下的铁保留率。由图 4 可以看出, CBP-Fe 在 pH 为 2 时铁保留率最低, 为 79.18%。当 pH 从 3 到 5 时, 铁的保留率从 82.89% 增加到 86.41%。在 pH 为 5 时, 铁保留率最高。随着 pH 的继续增加, 保留率开始下降, 但下降不明显。当 pH 为 9 时, 铁保留率为 81.17%。从总体变化上看, CBP-Fe 的铁保留率在碱性环境中更高。这一研究结果与汪卓^[26] 提出的蛋黄蛋白亚铁螯合肽酸碱稳定性结论一致。这可能是因为当环境 pH 为酸性时, H^+ 会与 Fe^{2+} 竞争与肽的螯合位点, 导致部分 Fe^{2+} 无法与肽结合^[23]。因此 CBP-Fe 在碱性环境中要比在酸性环境中更加稳定。

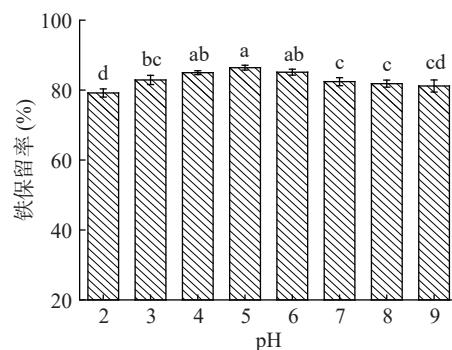


图 4 CBP-Fe 在不同 pH 下的铁保留率

Fig.4 Iron retention rate of CBP-Fe at different pH

2.5 Caco-2 细胞毒性试验分析

选用不同浓度(0.125、0.25、0.5、1、2、4 mg/mL)的 CBP-Fe 通过 MTT 法来测定其对于 Caco-2 细胞活力的影响, 结果如图 5 所示。结果表明, 当浓度在 0.125~0.1 mg/mL 时, 细胞活力降低不显著($P>0.05$)。而浓度升至 2 mg/mL 时, 细胞活力显著下降($P<0.05$)。当 CBP-Fe 溶液浓度升至 4 mg/mL 时, 作用后的细胞活力仍高于 80%。Caetano-silva 等^[27] 提出经乳清肽铁复合物处理后的 Caco-2 细胞活力大于 87%, 表明复合物不会损害细胞生长。这为后续试验提供了一定的参考。

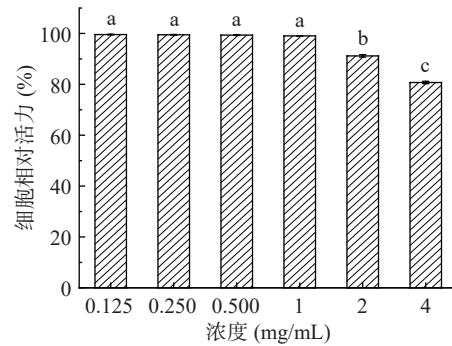


图 5 CBP-Fe 对 Caco-2 细胞活力的影响

Fig.5 Effect of CBP-Fe on the cell viability of Caco-2 cells

2.6 CBP-Fe 体外模拟消化

铁补充剂进入胃肠道后, 受周围环境中 pH 的变化和胃胰腺分泌蛋白酶等因素影响, 会形成不溶性化

合物, 从而导致铁的生物利用度降低^[28]。因此, 铁补充剂在胃肠道环境中的稳定性是其被充分利用, 提高铁生物利用度的关键因素。CBP-Fe、硫酸亚铁和葡萄糖酸亚铁在胃肠道中的稳定性结果见图 6。

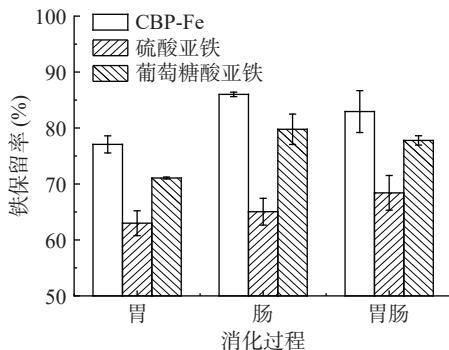


图 6 三种铁补充剂在胃肠消化过程中的铁保留率
Fig.6 Iron retention of three iron supplements during gastrointestinal digestion

CBP-Fe 经胃消化后的铁保留率为 77.08%, 肠消化后为 82.94%, 肠消化的铁保留率要高于胃消化部分, 这可能是因为模拟胃消化时, H^+ 浓度高, 与铁离子竞争给电子基团, 不利于肽和铁离子的结合^[29]。而肠道为碱性环境, CBP-Fe 本身在碱性环境中要比在酸性环境中更加稳定, 并且铁离子可能会在肠道中与肽重新螯合生成新的肽螯合铁^[26]。CBP-Fe 经完整的胃肠消化后, 铁保留率为 82.94%。这表明 CBP-Fe 在体外模拟胃肠消化时, 可以保持良好的稳定性。

此外, CBP-Fe 的铁保留率仍然要优于硫酸亚铁和葡萄糖酸亚铁。这说明 CBP-Fe 相比于其他膳食铁补充剂, 具有更好的生物利用度。Hu 等^[29]也提出了南极磷虾衍生的七肽铁络合物铁螯合肽对铁吸收的促进作用要比 $FeSO_4$ 更好。这些结果表明 CBP-Fe 具有一定的抗消化性, 有望作为功能性食品缓解铁缺乏。

2.7 不同膳食成分对 CBP-Fe 的影响分析

在日常饮食中如谷物、茶叶等通常含有植酸、草酸、多酚、膳食纤维等成分, 这些膳食成分具有金属螯合能力, 会与铁离子结合形成沉淀, 从而影响人体对铁的吸收, 降低铁的生物利用度^[30]。因此研究膳食成分对不同铁补充剂的影响, 对分析其生物利用度具有重要意义。

从图 7 可以看出, 植酸、草酸、膳食纤维分别存在的条件下, 三种铁补充剂的可溶性铁含量大小依次为: CBP-Fe 最高, 葡萄糖酸亚铁次之, 硫酸亚铁最低。表明 CBP-Fe 在膳食成分中比葡萄糖酸亚铁和硫酸亚铁稳定性更好。膳食成分的添加降低了金属离子的吸收, 而 CBP-Fe 由于 CBP 对铁离子有更强的螯合能力, 阻止了铁离子的沉淀。其他研究也表明铁肽复合物可以保护铁离子免受膳食成分的影响^[31]。此外, 图 7 也显示三种膳食成分中, 植酸对 CBP-Fe 的影响最大(可溶性铁含量为 70.28%), 其次是草

酸(可溶性铁含量为 73.96%), 膳食纤维的影响最小(可溶性铁含量为 76.11%)。这可能是因为植酸的磷酸基团与铁离子的结合能力更强^[32]。总体来说, CBP-Fe 能更好地抵抗植酸等膳食成分对铁吸收的抑制作用, 提高铁在人体内的生物利用度。

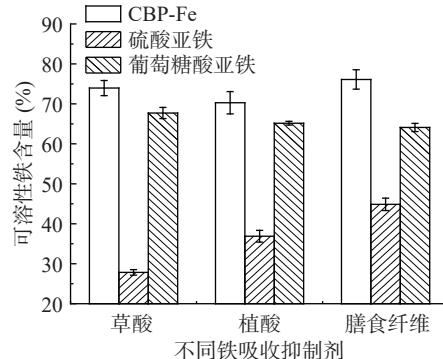


图 7 不同铁吸收抑制剂对三种铁补充剂可溶性铁含量的影响
Fig.7 Effect of different iron inhibitors on the soluble iron content of three iron supplements

3 结论

本文利用鸡血球肽制备了鸡血球肽螯合铁, 并通过试验表明它能够经受热处理和酸碱处理。在体外模拟胃肠消化试验中, 鸡血球肽螯合铁的稳定性优于葡萄糖酸亚铁和硫酸亚铁。此外, 鸡血球肽螯合铁相比于葡萄糖酸亚铁和硫酸亚铁, 能有效抵抗植酸、草酸和膳食纤维对铁吸收的抑制作用。本研究结果表明鸡血球肽螯合铁可以用作膳食补铁剂。此外, 未来还需对鸡血球肽与铁的具体结合方式以及吸收机制进行更多研究, 以便更好地提高铁在人体中的生物利用度。

参考文献

- [1] 2021 年肉鸡产业发展形势及 2022 年展望 [J]. 中国畜牧业, 2022 (3): 43-46. [Development situation of broiler industry in 2021 and prospect in 2022 [J]. China Animal Husbandry, 2022 (3): 43-46.]
- [2] HAMZEH A, WONGNGAM W, KIATSONGCHAI R, et al. Cellular and chemical antioxidant activities of chicken blood hydrolysates as affected by *in vitro* gastrointestinal digestion [J]. *Poultry Science*, 2019, 98(11): 6138-6148.
- [3] 宁芯, 黎梓玉, 班薇薇, 等. 酶法制备鸡血抗氧化肽及其抗氧化活性 [J]. 食品工业, 2020, 41(12): 129-133. [NING X, LI Z Y, BAN W W, et al. Optimization of preparation process for antioxidant peptides from chicken plasma and its antioxidant activities [J]. Food Industry, 2020, 41(12): 129-133.]
- [4] ZHENG Z, SI D, AHMAD B, et al. A novel antioxidative peptide derived from chicken blood corpuscle hydrolysate [J]. *Food Research International*, 2018, 106: 410-419.
- [5] 郑敏, 王钏. 融合铁工艺的研究进展 [J]. 现代食品, 2019(22): 32-34, 37. [ZHENG M, WANG C. Research processing of iron-chelation technology [J]. Modern Food, 2019(22): 32-34, 37.]
- [6] KALGAONKAR S, LÖNNERDAL B. Effects of dietary factors on iron uptake from ferritin by Caco-2 cells [J]. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 2008, 19(1): 33-39.

- [7] CAETANO-SILVA M E, NETTO F M, BERTOLDO-PACHECO M T, et al. Peptide-metal complexes: Obtention and role in increasing bioavailability and decreasing the pro-oxidant effect of minerals[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2021, 61(9): 1470–1489.
- [8] SHUBHAM K, ANUKIRUTHIKA T, DUTTA S, et al. Iron deficiency anemia: A comprehensive review on iron absorption, bioavailability and emerging food fortification approaches[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 99: 58–75.
- [9] 管玲娟, 曹丛丛, 屠飘涵, 等. 缺铁对肠道免疫功能的影响及新型补铁剂的研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(19): 264–270. [GUAN L J, CAO C C, TUP H, et al. Research progress of the effect of iron deficiency on intestinal immune function and new iron supplements[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2020, 46(19): 264–270.]
- [10] 林海燕, 王珊, 孙珊, 等. 响应面法优化南极磷虾亚铁螯合肽制备工艺及其理化性质[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(21): 166–173. [LIN H Y, WANG S, SUN S, et al. Optimization of preparation of iron-chelating peptides from Antarctic krill by response surface methodology and its physicochemical properties[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(21): 166–173.]
- [11] TIAN Q, FAN Y, HAO L, et al. A comprehensive review of calcium and ferrous ions chelating peptides: Preparation, structure and transport pathways[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2021: 1–13.
- [12] 杨玉蓉, 李安平, 钟政昌, 等. 桃仁多肽螯合亚铁的抑菌活性及结构表征[J]. *食品科学*, 2019, 40(5): 57–62. [YANG Y R, LI A P, ZHONG Z C, et al. Antibacterial activity and structural characterization of peach kernel peptide-ferrous chelate[J]. *Food Science*, 2019, 40(5): 57–62.]
- [13] 陈嘉琪, 张珍, 费莹莹, 等. 羊骨多肽亚铁螯合物的制备工艺优化及结构表征[J]. *食品与发酵科技*, 2021, 57(5): 1–7, 21. [CHEN J Q, ZHANG Z, FEI Y Y, et al. Preparation process optimization and structural characterization of sheep bone polypeptide chelate with ferrous iron[J]. *Food and Fermentation Science and Technology*, 2021, 57(5): 1–7, 21.]
- [14] CHEN Q, GUO L, DU F, et al. The chelating peptide (GPAGPHGPPG) derived from Alaska pollock skin enhances calcium, zinc and iron transport in Caco-2 cells[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2017, 52(5): 1283–1290.
- [15] YANG J, HUANG J, DONG X, et al. Purification and identification of antioxidant peptides from duck plasma proteins[J]. *Food Chemistry*, 2020, 319: 126534.
- [16] 杨静, 石景, 邹烨, 等. 鸡血多肽亚铁螯合物的制备工艺优化及结构表征[J]. *江苏农业学报*, 2022, 38(6): 1678–1685. [YANG J, SHI J, ZOU Y, et al. Preparation process optimization and structural characterization of chicken blood peptides-iron chelate[J]. *Jiangsu Journal of Agriculture Science*, 2022, 38(6): 1678–1685.]
- [17] 冯思敏, 王晶, 王羽莹, 等. 珍珠肽螯合钙的制备与性质表征[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(1): 119–126. [FENG S M, WANG J, WANG Y Y, et al. Preparation and properties of pearl peptide chelated calcium[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(1): 119–126.]
- [18] 庞忠莉. 牡蛎肽亚铁螯合物的制备及性质研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020. [PANG Z L. Study on preparation and properties of oyster peptide ferrous chelate[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.]
- [19] CAI X X, ZHAO L N, WANG S Y, et al. Fabrication and characterization of the nano-composite of whey protein hydrolysate chelated with calcium[J]. *Food & Function*, 2015, 6(3): 816–823.
- [20] WU W, HE L, LIANG Y, et al. Preparation process optimization of pig bone collagen peptide-calcium chelate using response surface methodology and its structural characterization and stability analysis[J]. *Food Chemistry*, 2019, 284: 80–89.
- [21] 张玲. 罗非鱼皮胶原降解反应行为及肽钙螯合物制备研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020. [ZHANG L. Studies on tilapia skin collagen degradation behavior and preparation of peptide calcium chelate[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.]
- [22] JIANG Y, LI J, ZHAO H, et al. Preparation of grape seed polypeptide and its calcium chelate with determination of calcium bioaccessibility and structural characterisation[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2021, 56(1): 166–177.
- [23] ZHANG Y, DING X, LI M. Preparation, characterization and *in vitro* stability of iron-chelating peptides from mung beans[J]. *Food Chemistry*, 2021, 349: 129101.
- [24] LI B, HE H, SHI W, et al. Effect of duck egg white peptide-ferrous chelate on iron bioavailability *in vivo* and structure characterization[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2019, 99(4): 1834–1841.
- [25] SHILPASHREE B G, ARORA S, SHARMA V. Preparation of iron/zinc bound whey protein concentrate complexes and their stability[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2016, 66: 514–522.
- [26] 汪卓. 蛋黄蛋白亚铁螯合肽的制备及螯合特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021. [WANG Z. Preparation and chelating properties of egg yolk protein ferrous chelating peptide[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.]
- [27] CAETANO-SILVA M E, CILLA A, BERTOLDO-PACHECO M T, et al. Evaluation of *in vitro* iron bioavailability in free form and as whey peptide-iron complexes[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2018, 68: 95–100.
- [28] SUN X, SARTESHNIZI R A, BOACHIE R T, et al. Peptide-mineral complexes: Understanding their chemical interactions, bioavailability, and potential application in mitigating micronutrient deficiency[J]. *Foods*, 2020, 9(10): 1–17.
- [29] HU S, LIN S, LIU Y, et al. Exploration of iron-binding mode, digestion kinetics, and iron absorption behavior of Antarctic krill-derived heptapeptide-iron complex[J]. *Food Research International*, 2022: 154.
- [30] MATTAR G, HADDARAH A, HADDAD J, et al. New approaches, bioavailability and the use of chelates as a promising method for food fortification[J]. *Food Chemistry*, 2022, 373: 131394.
- [31] LI Y, JIANG H, HUANG G. Protein hydrolysates as promoters of non-haem iron absorption[J]. *Nutrients*, 2017, 9(6): 609.
- [32] LI J P, GONG C G, WANG Z Y, et al. Oyster-derived zinc-binding peptide modified by plastein reaction via zinc chelation promotes the intestinal absorption of zinc[J]. *Marine Drugs*, 2019, 17(6): 341.