

热处理方式对虾青素强化鸡蛋消化特性的影响

顾璐萍, 范巧, 李俊华, 常翠华, 杨严俊, 苏宇杰

Impacts of Thermal Treatment on the Digestibility of Astaxanthin-enriched Eggs

GU Luping, FAN Qiao, LI Junhua, CHANG Cuihua, YANG Yanjun, and SU Yujie

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022060116>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

南极磷虾油中虾青素分子种组成及其消化吸收特性研究

Molecular Composition, Digestion and Absorption Characteristics of Astaxanthin in Antarctic Krill Oil

食品工业科技. 2021, 42(12): 347-353

热处理方式对南美白对虾虾青素含量、氨基酸组成及脂肪酸组成的影响

Effect of heat treatment methods on the astaxanthin content, the amino acid composition and the fatty acid composition of *Penaeus Vannamei*

食品工业科技. 2017(23): 14-18

苦荞凝集素的稳定性及体外消化性

The Stability and *in Vitro* Digestibility of Lectin from Tartary Buckwheat(*Fagopyrum tataricum*)

食品工业科技. 2018, 39(24): 57-61

微波热处理对马铃薯全粉品质改良及马铃薯面包消化特性的影响

Effect of Microwave Heat Treatment on Whole Potato Flour and Digestive Properties of Potato Bread

食品工业科技. 2021, 42(12): 1-7

热处理对乳铁蛋白-β-胡萝卜素/大豆多糖-DHA乳状液微流变特性的影响

Effect of heat treatment on the microrheological properties of lactoferrin-β-carotene/soybean polysaccharide-DHA emulsion

食品工业科技. 2017(18): 1-7

虾青素化学和生物合成研究进展

Research Progress on Chemical and Biological Synthesis of Astaxanthin

食品工业科技. 2021, 42(21): 445-453



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

顾璐萍, 范巧, 李俊华, 等. 热处理方式对虾青素强化鸡蛋消化特性的影响 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(23): 112-118. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022060116

GU Luping, FAN Qiao, LI Junhua, et al. Impacts of Thermal Treatment on the Digestibility of Astaxanthin-enriched Eggs[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(23): 112-118. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022060116

· 研究与探讨 ·

热处理方式对虾青素强化鸡蛋消化特性的影响

顾璐萍^{1,2,3}, 范巧^{1,2,3}, 李俊华^{1,2,3}, 常翠华^{1,2,3}, 杨严俊^{1,2,3}, 苏宇杰^{1,2,3,*}

(1.食品科学与技术国家重点实验室(江南大学), 江苏无锡 214122;

2.国家功能食品工程技术研究中心(江南大学), 江苏无锡 214122;

3.江南大学食品学院, 江苏无锡 214122)

摘要: 本文旨在考察温泉蛋、溏心蛋、全熟蛋、煎蛋四种热处理方式对虾青素强化鸡蛋稳定性的影响, 并通过构建体外消化模型对其消化特性进行分析, 包括脂肪消化率、蛋白质消化率、蛋白质分子量分布情况及虾青素的生物保留率和生物可给率。研究发现热处理会导致虾青素发生不同程度的降解, 其中温泉蛋中虾青素的保留率最高, 达 97.21%, 相比较鲜蛋, 水煮蛋可以提高虾青素强化鸡蛋中脂肪和蛋白质的消化率, 其中溏心蛋和温泉蛋最容易被消化, 而煎蛋反而造成消化率下降。凝胶电泳图结果表明溏心蛋和温泉蛋消化完后的蛋白大分子段分布减少, 证实这两种热处理方式的鸡蛋具有较高的蛋白质消化率。热处理对虾青素的生物保留率并无显著影响, 为 48.76%~49.47%; 但水煮蛋有利于提高虾青素的生物可给率, 其中溏心蛋和温泉蛋无显著性差异, 具有较高的生物可给率, 分别达 48.76% 和 47.71%。以上研究结果表明, 溏心虾青素强化鸡蛋可作为补充天然虾青素的一种新途径。

关键词: 虾青素, 热处理, 稳定性, 消化特性, 生物可给率

中图分类号: TS253.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)23-0112-07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022060116



本文网刊:

Impacts of Thermal Treatment on the Digestibility of Astaxanthin-enriched Eggs

GU Luping^{1,2,3}, FAN Qiao^{1,2,3}, LI Junhua^{1,2,3}, CHANG Cuihua^{1,2,3}, YANG Yanjun^{1,2,3}, SU Yujie^{1,2,3,*}

(1.State Key Laboratory of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

2.National Functional Food Engineering Technology Research Center, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

3.School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: The objective of this study was to investigate the impacts of four thermal treatments on the stability of astaxanthin-enriched eggs (hot spring, soft-boiled, hard-boiled and pan-fried eggs). And a simulated gastrointestinal tract model was designed to evaluate the lipid and protein digestibility, molecular weight distribution of protein, biostability and bioaccessibility of astaxanthin. Results showed that thermal treatment led to the degradation of astaxanthin. Among these, soft-boiled had the highest retention ratio, 97.21%. Compared with raw eggs, boiled eggs had higher lipid and protein digestibility. Soft-boiled and hot spring eggs exhibited the highest digestibility, however, a lower digestibility was observed on the pan-fried eggs. These results were confirmed by electrophoresis analysis that the fractions with high molecular weight in the soft-boiled and hot spring eggs disappeared. There was no significant difference on the biostability of eggs astaxanthin under different thermal treatment, which was 48.76%~49.47%, while boiling eggs could effectively improve the bioaccessibility as compared with raw eggs. The soft-boiled and hot spring eggs exhibited relatively higher bioaccessibility,

收稿日期: 2022-06-14

基金项目: 国家自然科学基金(31901642)。

作者简介: 顾璐萍(1989-), 女, 博士, 助理研究员, 研究方向: 蛋制品加工与研究, E-mail: guping@jiangnan.edu.cn。

* 通信作者: 苏宇杰(1982-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 蛋制品加工与研究, E-mail: suyujie@jiangnan.edu.cn。

48.76% and 47.71%, respectively. These results suggested that soft-boiled astaxanthin-enriched eggs could be used as a promising approach for natural astaxanthin supplementation.

Key words: astaxanthin; thermal treatment; stability; digestibility; bioaccessibility

虾青素是一种含氧类胡萝卜素,具有着色、抗氧化、提高免疫力、预防皮肤癌、预防糖尿病和黄斑退化、改善动脉硬化、预防心血管疾病、抗炎症等功能^[1-3]。但人体自身不能合成虾青素,需从外界食物中摄取。天然食物中(以雨生红球藻为主)虾青素以酯化型为主,具有较高的稳定性,但生物利用率不高,且价格昂贵^[4-7],而合成型虾青素在安全性、功效性方面不如天然虾青素^[8]。

以蛋鸡作为载体,通过生物富集形式生产虾青素营养强化鸡蛋,成为获得天然安全且高生物利用率虾青素的新途径。据文献报道,在饲料中添加富含酯化型虾青素的雨生红球藻,蛋鸡可将虾青素转化为游离态且沉积到蛋黄中,提升鸡蛋的营养价值,加深蛋黄颜色,且这种形式的虾青素生物利用度较高^[9-11]。同时,虾青素还具有增强动物免疫力,缓解老年蛋鸡卵巢衰退等功能^[12]。此外,鸡蛋含有丰富的优质蛋白,蛋黄中含有丰富的卵磷脂、固醇类、矿物质及维生素^[13-15],是一种营养价值很高的食物。因此,鸡蛋可作为虾青素的一种理想来源。鸡蛋通常是经过加热后食用,比如煮蛋和煎蛋,煮蛋又可以根据受热程度不同可分为温泉蛋、溏心蛋和全熟蛋,但是经不同热处理方式获得的虾青素强化蛋制品的研究鲜见报道。

鉴于此,本文通过对比温泉蛋、溏心蛋、全熟蛋、煎蛋四种不同热处理方式对虾青素强化鸡蛋的稳定性的影响,并构建体外消化模型对其脂肪消化率、蛋白质消化率、虾青素的生物可给率等因素进行分析,旨在为消费者提供一个安全有效补充虾青素的新途径。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

考马斯亮蓝 G-250、十二烷基硫酸钠、过氧化氢、异苯丙、三氯甲烷(氯仿)、牛血清白蛋白、聚丙烯酰胺、色谱级甲基叔丁基醚、色谱级乙酸乙酯 国药集团化学试剂有限公司;色谱级甲醇、色谱级四氢呋喃、AST 标准品(98%)、细胞色素 C、牛胰岛素、杆菌肽、谷胱甘肽、甘氨酸 上海泰坦科技股份有限公司;胃蛋白酶(2.5×10^5 U/g)、脂肪酶(1×10^4 U/g)、胰酶(8×10^3 U/g)、猪胆盐 Sigma-Aldrich 公司;即用型蛋白质分子量标准(Premixed protein marker, high)、蛋白质 SDS 聚丙烯酰胺凝胶电泳上样缓冲液(2×) 宝生物科技有限公司;基础饲料 山东福星饲料有限公司。

ME104TE/00 电子天平 梅特勒托利多科技(中国)有限公司;EJ28M4 不粘煎锅 浙江苏泊尔股份有限公司;ORKAEA-01 蛋品质分析仪 以色列

ORKA 食品科技有限公司;5430R 高速离心机 德国 Eppendorf 公司;THS-15 数控超级恒温槽 宁波天恒仪器有限公司;UV-2600 紫外分光光度计 日本岛津公司;Waters e2695 高效液相色谱仪 美国 Waters 公司;Power Pac 凝胶电泳装置、ChemiDoc XRS+化学凝胶成像仪 美国 Bio-Rad 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 虾青素强化鸡蛋的生产 虾青素强化鸡蛋的生产在山东松山岛食品科技有限公司进行。选取 120 只 300 日龄海兰鸡,随机分为 2 组(实验组,对照组)。饲喂周期为 6 周,预饲期一周内两组均饲喂基础饲料,接下来对对照组继续饲喂基础饲料,实验组在基础饲料中添加 1.5% 雨生红球藻(虾青素含量为 220 mg/kg),饲喂 5 周。蛋鸡采用单笼饲养,自由饮水与饮食,每日光照时间 16 h,养鸡场温度控制在 22~25 °C。基础饲料的配方组成及营养水平为(风干基础):玉米(61.8%)、豆粕(24.2%)、小麦麸(5.5%)、石灰石(5.5%)、盐(1.2%)、L-赖氨酸(0.6%)、DL-蛋氨酸(0.3%)、预混物(1.0%)、粗蛋白(17.8%)、总磷(0.4%)、钙(3.0%)、代谢能(2702 kcal/kg)。注:a.预混物为每千克饲料提供: V_A (10000 IU)、 V_{B1} (5.0 mg)、 V_{B2} (18.0 mg)、 V_{B3} (32.5 mg)、 V_{B6} (5.0 mg)、 V_{B12} (0.2 mg)、 V_{D3} (5000.0 IU)、 V_E (200.0 IU)、生物素(4.0 mg)、叶酸(1.0 mg)、铁(0.2 g)、锰(0.2 g)、锌(0.1 g)、硒(4.0 mg);b.代谢能为计算值,其它成分含量为测量值。

1.2.2 虾青素强化鸡蛋品质的测定 利用电子天平称量并记录鸡蛋重量(g),采用蛋品质分析仪测定蛋黄颜色和鸡蛋的哈夫单位,参照食品安全国家标准 GB/T 5009.5-2016《食品中蛋白质的测定》测定鸡蛋中蛋白质含量,参照食品安全国家标准 GB/T 5009.6-2016《食品中脂肪的测定》测定鸡蛋中脂肪含量,参照 Dansou 等^[16]的方法测定蛋黄中的虾青素含量。首先,称取 1.00 g 蛋黄样品,向其中加入 5 mL 四氢呋喃/甲醇(1:1, v/v),涡旋 2 min,然后将离心管置于 60 °C 水浴锅中保温 20 min,向其中加入 5 mL 乙酸乙酯,然后再次涡旋 2 min,随后将提取液在 4 °C 下以 4000×g 转速离心 5 min。离心结束后,将上清液通过 0.22 μ m 微孔过滤膜过滤到高效液相色谱棕色小瓶中待测。液相条件如下,色谱柱:YMC C30 (250 mm×4.6 mm, 5 μ m, 日本 YMC 公司);柱温:25 °C;流动相:甲醇/叔丁基甲基醚/水,比例为 78:14:8(v/v/v),等度洗脱;流速:1.0 mL/min;检测波长:471 nm;进样量:10 μ L。取虾青素标准品,使用流动相配制 0.5、1.0、2.0、4.0、6.0、8.0 μ g/mL 系列标准溶液,得到标准曲线: $y=45910x+72376$, $R^2=0.9909$ 。

1.2.3 不同热处理方式虾青素强化蛋制品的制备 参照王瑶瑶等^[17]的方法对鸡蛋进行热处理,并作适当修改。具体条件如下:

a.温泉蛋:将虾青素强化鸡蛋置于恒温水浴锅中,65℃温度下保温30 min,然后冷水浴5 min。

b.溏心蛋:将虾青素鸡蛋在沸水浴中加热5 min,然后冷水浴5 min。

c.全熟蛋:将虾青素鸡蛋在沸水浴中加热8 min,然后冷水浴5 min。

d.煎蛋:将虾青素鸡蛋去壳后倒进不粘煎锅里,小火煎至鸡蛋凝固即离火。

1.2.4 虾青素稳定性的测定 虾青素属于多元不饱和分子,当暴露在光照、高温、氧气和过渡金属存在的条件下,极易被氧化降解。因此不同热处理方式可能会造成虾青素发生不同程度的氧化降解,导致保留率下降。参照1.2.2测定新鲜蛋液中虾青素的含量,记为 m_0 ;经过不同热处理方式得到的虾青素强化蛋制品中虾青素的含量,记为 m ,再根据以下公式计算虾青素的保留率。保留率越高代表稳定性越高。

$$\text{虾青素保留率}(\%) = \frac{m}{m_0} \times 100 \quad \text{式(1)}$$

1.2.5 虾青素强化鸡蛋的体外消化实验 鸡蛋成分复杂,可分为蛋清和蛋黄两个组分。蛋清蛋白与蛋黄蛋白的组成差异巨大,蛋清的主要成分为蛋白质,如卵白蛋白、卵转铁蛋白、溶菌酶等;而蛋黄中的蛋白质以脂蛋白为主,且含有高磷蛋白、卵黄蛋白等。此外,脂肪和虾青素主要集中在蛋黄中。因此,本文将温泉蛋、溏心蛋、全熟蛋和煎蛋的蛋清和蛋黄小心分开,分别进行体外消化实验,用于后续的脂肪消化率、蛋白质消化率及虾青素生物可给率的测定。温泉蛋的蛋清较稀,需要小心分离,个别边缘处不好分离的则丢弃,避免影响研究结果的准确性。

参照Brodkorb等^[18]的方法对虾青素强化鸡蛋进行体外肠胃模拟消化,并作适当修改。a.模拟胃部消化阶段:精确称取0.2 g蛋清或者蛋黄样品分散于7.023 mL去离子水中,加入12 mL盐溶液(配方见表1)、0.03 mL $\text{CaCl}_2(\text{H}_2\text{O})_2$ (0.3 mol/L)和0.4 mL HCl (5 mol/L),搅拌均匀,调节pH至2.0,再加入0.667 mL胃蛋白酶液(32 mg/mL)和0.48 mL胃脂肪酶液(83.3 mg/mL),立即置于恒温振荡培养箱中

反应2 h(37℃, 180 r/min); b.模拟小肠消化阶段:在胃部消化阶段完成后,在胃消化液中加入8 mL盐溶液、0.04 mL $\text{CaCl}_2(\text{H}_2\text{O})_2$ (0.3 mol/L)、3.16 mL去离子水和0.8 mL NaOH (5 mol/L),搅拌均匀,再加入3 mL胆汁(200 mg/mL),调节pH至7.0,立即加入5 mL胰酶液(133 mg/mL),然后迅速置于恒温振荡培养箱中反应2 h(37℃, 180 r/min)。为了确保实验结果的准确性,所有样品已提前预热至37℃。未经过热处理的蛋清和蛋黄液作为对照组。

1.2.6 脂肪消化率的测定 参考Hur等^[19]的方法测定脂肪消化率。称取1 g蛋黄样品的小肠消化液,加入适量无水硫酸钠,然后向其中加入50 mL石油醚(30~60℃),混匀后放置过夜。将混合液过滤后收集25 mL滤液,向滤液中加入50 mL无水乙醇,滴加2~3滴酚酞,用 KOH 溶液进行滴定。以游离脂肪酸表征脂肪消化率,游离脂肪酸按以下公式计算:

$$\text{游离脂肪酸}(\text{KOH/g}) = 5.611 \times \frac{A \times F}{m} \quad \text{式(2)}$$

其中,A代表滴定液体积,mL;F代表滴定液浓度,0.01 mol/L;m代表蛋黄样品的质量,g。

1.2.7 蛋白质消化率的测定 取10 mL蛋清和蛋黄的小肠消化液,以5000 r/min离心10 min,收集上清液备用。参考Branford^[20]的方法测定蛋白质含量。取50 μL 上清液与4 mL考马斯亮蓝溶液于离心管,混合均匀后静置5 min,在595 nm处测定吸光值。以牛血清蛋白为标准品绘制标准曲线($y=0.9423x+0.00952$, $R^2=0.9977$),计算蛋白质含量,再按照以下公式计算蛋白质消化率:

$$\text{蛋白质体外消化率}(\%) = \frac{m}{m_0} \times 100 \quad \text{式(3)}$$

式中,m代表上清液中蛋白质含量,g; m_0 代表消化前蛋清或蛋黄样品中蛋白质含量,g。

1.2.8 聚丙烯酰胺凝胶电泳分析 参照Wang等^[21]的方法分析消化液中蛋白质的分子量情况。浓缩胶和分离胶的浓度分别为5%、12%,将上述的蛋清或蛋黄样品的小肠消化上清液与2 $\times$ 上样缓冲液混合均匀,沸水浴5 min,然后取10 μL 样品上样。初始电压设置为80 mV恒定电压,待样品全部进入分离胶后,将电压设置为120 mV恒定电压。电泳结束后,将电泳胶剥离并转移到在染色液(考马斯亮蓝G250/甲醇/乙酸/去离子水,0.1:45:10:45, v/v/v/v)中浸泡1 h,然后转移到脱色液(甲醇/乙酸/去离子水,1:1:8, v/v/v)中浸泡1 h。最后用化学凝胶成像仪进行成像。

1.2.9 蛋白质分子量分布情况的分析 将蛋清或蛋黄样品的小肠消化上清液通过0.45 μm 水系微孔过滤膜过滤后,采用液相色谱仪测定蛋白质分子量的分布情况。液相条件如下,色谱柱:TSKgel G2000-SWXL液相色谱分析柱(300 mm $\times$ 7.8 mm,日本东曹株式会社);流动相:水/乙腈/三氟乙酸(4:6:0.05,

表1 盐溶液成分表

Table 1 Composition of salt solution

名称	添加量(mL)	浓度(mol/L)
$\text{CaCl}_2(\text{H}_2\text{O})_2$	0.5	0.3
KCl	30	0.5
KH_2PO_4	6	0.5
NaHCO_3	65	1
NaCl	25	2
$\text{MgCl}_2(\text{H}_2\text{O})_6$	2	0.15
$(\text{NH}_3)_2\text{CO}_3$	2	0.5

v/v/v);流速为 1.0 mL/min;进样量: 10 μ L;柱温: 25 $^{\circ}$ C;检测波长: 241 nm。以五种标准品细胞色素 C、牛胰胰岛素、杆菌肽、谷胱甘肽和甘氨酸绘制标准曲线($y=-0.4592x+6.8447, R^2=0.9598$)。

1.2.10 虾青素生物可给率的测定 体外消化实验结束后,立即将蛋黄样品的小肠消化液在冰水浴 30 min,然后取 20 mL 消化液在 10000 r/min, 4 $^{\circ}$ C 下离心 30 min,上层清液即为胶束层,参照 1.2.2 分别测定消化前样品、小肠消化液样品、胶束层样品中虾青素的含量,并根据以下公式计算虾青素的生物可给率和生物保留率:

$$\text{生物可给率}(\%) = \frac{m_{\text{Micelle}}}{m_{\text{Digesta}}} \times 100$$

式 (4)

$$\text{生物保留率}(\%) = \frac{m_{\text{Digesta}}}{m_{\text{Sample}}} \times 100$$

式 (5)

式中, m_{Micelle} : 胶束团中虾青素含量, g; m_{Digesta} : 小肠消化液中虾青素含量, g; m_{Sample} : 消化前样品中虾青素含量, g。

1.3 数据处理

每组数据至少采用 3 个平行,数据表示为平均值 $\pm$ 标准差。采用 Origin 2018 和 SPSS 22.0 软件进行数据分析及作图,多重比较之间的差异采用单因素方差分析和 Duncan 检验进行显著性分析($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 虾青素富集对鸡蛋品质的影响

如表 2 所示,虾青素强化鸡蛋与对照组鸡蛋的蛋重、哈夫单位、蛋白质含量、脂肪含量均无显著差异。Heng 等^[22]研究了日粮中添加雨生红球藻对鸡蛋品质的影响,结果发现,虾青素强化鸡蛋与对照组鸡蛋的哈夫单位、蛋重等指标均无显著差异。Walker 等^[10]也发现虾青素强化鸡蛋的脂质、磷脂组成与对照组鸡蛋相比并无显著差异,与本文结论基本一致。强化鸡蛋中虾青素含量达到 102.09 μ g/g,而普通蛋黄中未检测到虾青素,说明虾青素从饲料中经由母鸡体内转化成功沉积在蛋黄中,这也是蛋黄颜色较深的原因。Dansou 等^[16]报道鸡蛋中虾青素含量与饲料中虾青素添加剂量成正比,213.4 mg/kg 添加剂量组鸡蛋虾青素含量达到 79.45 μ g/g; Gao 等^[11]研究发现 100 mg/kg 添加组在饲喂 6 周后收集的鸡蛋中虾青素达到最高富集量 44.20 mg/kg。与前人的文献相

比,本实验制备的强化鸡蛋中虾青素含量更高可能是受到鸡的品种、饲喂周期、饲料中虾青素剂量的影响。

2.2 不同热处理方式对虾青素稳定性的影响

如表 3 所示,经过加热后,温泉蛋、溏心蛋、全熟蛋、煎蛋中虾青素的保留率分别为 97.21%、96.58%、91.04% 和 87.88%,结果表明热加热会造成虾青素一定的损失,随着加热程度的增加,损失越多。这主要是因为虾青素分子结构中含有大量的双键,对温度比较敏感,随着温度的加剧,导致双键变得更活泼,容易断裂而发生氧化降解^[23-24]。

表 3 不同热处理方式对虾青素稳定性的影响

Table 3 Effect of thermal treatment on astaxanthin retention of astaxanthin-enriched eggs

组别	温泉蛋	溏心蛋	全熟蛋	煎蛋
虾青素保留率(%)	97.21 $\pm$ 0.12 ^a	96.58 $\pm$ 0.24 ^b	91.04 $\pm$ 0.38 ^c	87.88 $\pm$ 0.27 ^d

2.3 不同热处理方式对虾青素强化鸡蛋脂肪消化率的影响

如图 1 所示,相比较鲜蛋,煮蛋可以提高虾青素强化鸡蛋脂肪消化率,且温泉蛋和溏心蛋之间脂肪消化率并无显著差异($P>0.05$),而煎蛋反而造成脂肪消化率下降,这可能是由于煎蛋时高温导致蛋白质变性严重,分子粒径增大,比表面积下降,不利于油脂被脂肪酶作用^[25]。

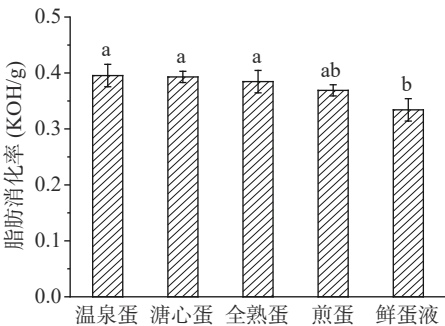


图 1 不同热处理方式对虾青素强化鸡蛋脂肪消化率的影响
Fig.1 Effect of thermal treatment on the lipid digestion rate of astaxanthin-enriched eggs

注: 不同字母表示同一指标下数值间具有显著性差异($P<0.05$);图 2、图 4 同。

2.4 不同热处理方式对虾青素强化鸡蛋蛋白质消化率的影响

由图 2 可知,不同热处理方式下蛋清中蛋白质消化率由高至低依次为: 溏心蛋 $\approx$ 温泉蛋 $>$ 全熟蛋 $>$ 鲜蛋液 $>$ 煎蛋,不同热方式下蛋黄中蛋白质消化率由高至低依次为: 溏心蛋 $\approx$ 温泉蛋 $\approx$ 全熟蛋 $>$ 煎蛋 $>$ 鲜蛋液。Wang 等^[21]研究了不同温度(4、56、65、100 $^{\circ}$ C)热处理对鸡蛋蛋清的蛋白质体外消化率产生的影响,结果发现在 65 $^{\circ}$ C 下热处理的蛋清具有最高的蛋白消化率,说明热处理可以提高蛋白质的消化,但过度热处理反而产生不利影响,这与本文实验结果基本一致。原因可能是鸡蛋经过热处理会使得蛋白质发生

表 2 虾青素富集对鸡蛋品质的影响

Table 2 Effect of astaxanthin enrichment on the egg quality

理化指标	虾青素强化鸡蛋	普通鸡蛋
蛋重(g)	61.20 $\pm$ 4.15 ^a	60.82 $\pm$ 3.67 ^a
蛋黄颜色	13.02 $\pm$ 0.04 ^a	6.98 $\pm$ 0.02 ^b
哈夫单位	81.50 $\pm$ 1.45 ^a	83.80 $\pm$ 3.70 ^a
蛋白质含量(%)	13.37 $\pm$ 0.01 ^a	13.35 $\pm$ 0.02 ^a
脂质含量(%)	32.62 $\pm$ 0.17 ^a	32.62 $\pm$ 0.16 ^a
虾青素含量(μ g/g)	102.09 $\pm$ 0.38	未检出

注: 同行不同字母表示数值间具有显著性差异($P<0.05$),表3同。

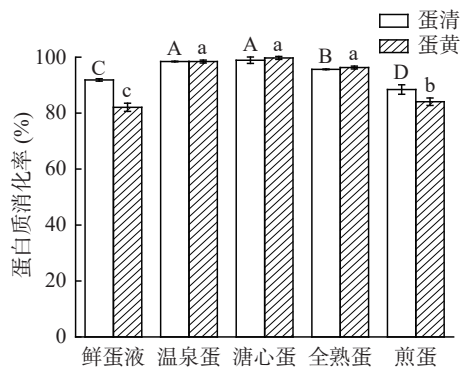


图2 不同热处理方式对虾青素强化鸡蛋蛋白质消化率的影响

Fig.2 Effect of thermal treatment on the protein digestion rate of astaxanthin-enriched eggs

变性、肽链出现松动或者发生断裂,还会导致抗营养因子变性或是失活,从而增加蛋白质对消化酶的敏感性,有利于蛋白质消化^[26-27]。然而,煎蛋的蛋白质消化率要低于煮蛋,可能是因为加热过度会导致氨基酸脱硫和异构化,或导致蛋白质与糖、脂质和食品添加剂发生反应,使得蛋白质消化率下降^[28]。

2.5 不同热处理方式对虾青素强化鸡蛋消化液中蛋白质分子分布情况的影响

饮食中的蛋白质和多肽被人体摄入后,在胃肠道消化中被消化酶水解为不同长度的多肽和氨基酸,

最终被人体消化吸收^[29]。如图3所示,在经过体外模拟消化后,蛋黄蛋白与蛋清蛋白的分子量均低于44.3 kDa。不同热方式之间的差别在于热处理的温度和时间不同带来的鸡蛋质地的差别,随着热处理程度的增加,条带强度逐渐增强,结果表明煎蛋、全熟蛋未消化蛋白多于溏心蛋、温泉蛋,蛋白消化率较低,结果与蛋白消化率一致(图2)。

虾青素强化鸡蛋经体外模拟消化后蛋白质分子量分布如表4所示,结果表明温泉蛋和溏心蛋蛋清消化完后的肽段分子量更低,<500 Da 肽段部分分别占 66.34% 和 65.91%,归因于卵白蛋白发生适度变性,有利于提高蛋白质消化率,因此消化完蛋白大分子段分布减少;而煎蛋在加热过程中卵白蛋白变性过度反而不利于蛋白质消化。理论上,蛋黄蛋白质比蛋清蛋白质更难消化,这是因为蛋黄中的高磷蛋白和高密度脂蛋白不易被酶作用^[30]。然而,研究发现蛋黄蛋白质消化后小分子肽段(<500 Da)占比远高于蛋清蛋白质,这可能归因于在液相色谱测定前样品要进行过滤膜处理,导致蛋黄中不溶性蛋白质(如高磷蛋白和高密度脂蛋白)已被去除,导致结果出现偏差。后续需结合其他技术手段对蛋白质分子量分布进行分析。

2.6 不同热处理方式对虾青素生物保留率与生物可给率的影响

生物保留率是指脂溶性营养素经过胃肠道消化

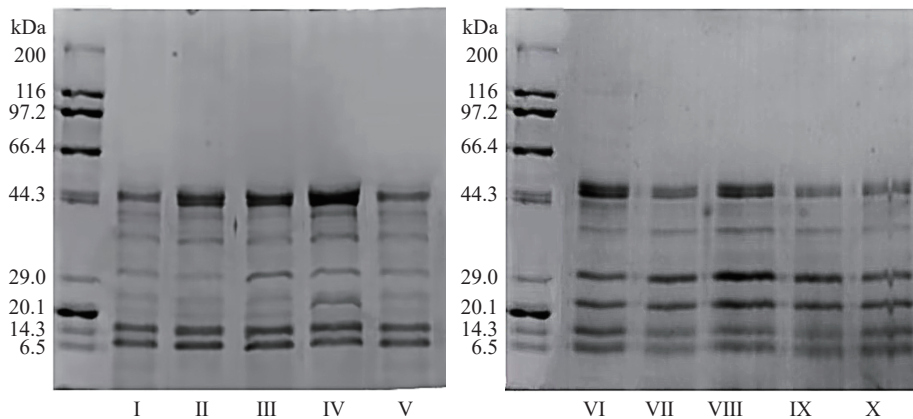


图3 不同热处理方式的虾青素强化鸡蛋消化液中蛋白质的 SDS-PAGE 电泳图

Fig.3 SDS-PAGE electrophoresis of astaxanthin-enriched eggs treated with different thermal treatment

注: I 温泉蛋蛋清、II 溏心蛋蛋清、III 全熟蛋蛋清、IV 煎蛋蛋清、V 鲜蛋清、VI 温泉蛋蛋黄、VII 溏心蛋蛋黄、VIII 全熟蛋蛋黄、IX 煎蛋蛋黄、X 鲜蛋黄。

表4 不同热处理方式的虾青素强化鸡蛋在体外模拟消化后蛋白分子量分布

Table 4 Protein molecular weight distribution of astaxanthin-enriched eggs treated with different thermal treatment after *in vitro* digestion

分子量范围	蛋清(%)					蛋黄(%)				
	鲜蛋液	温泉蛋	溏心蛋	全熟蛋	煎蛋	鲜蛋液	温泉蛋	溏心蛋	全熟蛋	煎蛋
>10 kDa	4.63 ^d	3.88 ^d	3.41 ^d	5.70 ^d	4.90 ^d	5.33 ^c	5.22 ^c	4.72 ^c	5.88 ^{bc}	6.11 ^c
1~10 kDa	28.68 ^b	9.44 ^c	9.83 ^c	9.47 ^c	60.60 ^a	9.60 ^b	8.45 ^b	8.80 ^b	8.54 ^b	8.27 ^b
500~1000 Da	19.18 ^c	20.34 ^b	20.85 ^b	23.52 ^b	20.59 ^b	—	—	—	—	—
<500 Da	47.51 ^a	66.34 ^a	65.91 ^a	61.31 ^a	13.91 ^c	85.07 ^a	86.32 ^a	86.48 ^a	85.59 ^a	85.61 ^a
总和	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

注: 同列不同字母表示数值间具有显著性差异($P<0.05$)。

后的保留率,是小肠消化液中营养素的含量与消化前营养素的含量的比值。如图 4 所示,鲜蛋液与经过不同热处理方式鸡蛋之间的虾青素生物保留率并无显著差异($P>0.05$),为 48.76%~49.47%。虾青素在消化过程中不可避免会产生损失,这是由于虾青素本身对胃部的强酸性环境较为敏感以及在 37 °C 环境下的自然降解。

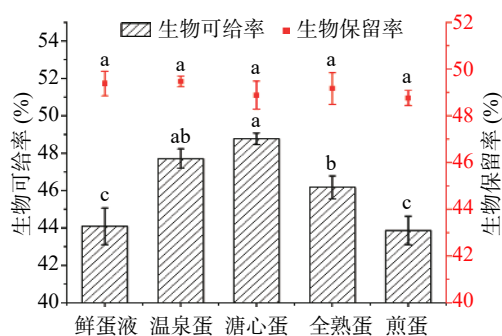


图 4 不同热处理方式的虾青素强化鸡蛋中虾青素的生物利用度

Fig.4 Biostability and bioaccessibility of astaxanthin-enriched eggs treated with different thermal treatment

脂溶性营养素的生物可给率是指营养素在摄入后被载入混合胶束或囊泡中成为可被小肠吸收的比例。虾青素生物可给率由高至低依次为: 溏心蛋~温泉蛋>全熟蛋>鲜蛋液~煎蛋。其中,煮蛋的虾青素生物可给率显著高于煎蛋($P<0.05$),可能是由于在不同的热条件下,蛋黄中的蛋白质和油脂会发生不同程度的结构变化影响了胶束化效率,另一方面可能是由于煮蛋相对煎蛋会更好的与消化液混合,因此煮蛋蛋黄与消化酶的接触面积更大。而煮蛋之间的生物可给率差异可能是因为在不同煮制温度和煮制时长下,蛋黄质地之间的差别影响了胶质化效率^[31]。Nimalaratne 等^[32] 研究发现不同热处理方式鸡蛋中叶黄素的生物保留率无明显差异,而生物可给率具有显著差异,这与本文研究结果基本一致。

3 结论

本文重点考察了温泉蛋、溏心蛋、全熟蛋、煎蛋四种热处理方式对虾青素强化鸡蛋稳定性和消化情况的影响,研究结果表明,温泉蛋中虾青素的保留率最高(97.21%),煎蛋的保留率最低(87.88%)。相比较鲜蛋,水煮蛋可以提高虾青素强化鸡蛋中的脂肪和蛋白质消化率,尤其是溏心蛋和温泉蛋表现出最高的消化率,消化完后的蛋白大分子段分布减少,肽段分子量更低;而煎蛋反而不利于鸡蛋蛋白质的消化。热处理方式对虾青素的生物保留率并无显著影响,为 48.76%~49.47%,但水煮蛋可以提高虾青素的生物可给率,其中溏心蛋和温泉蛋中的虾青素具有较高的生物可给率,分别为 48.76% 和 47.71%。以上研究结果为开发天然安全且高生物利用率虾青素产品提供一种新思路,这对于推进健康营养食品的加工水平,具有一定的科学研究意义和实际应用价值。但本文

仅采用体外消化模型探究了虾青素强化鸡蛋的消化特性,后续可构建细胞动物模型进一步探究并揭示其内在的分子机制。

参考文献

- [1] STACHOWIAK B, SZULC P. Astaxanthin for the food industry[J]. *Molecules*, 2021, 26(9): 2666.
- [2] FAKHRI S, ABBASZADEH F, DARAGHI L, et al. Astaxanthin: A mechanistic review on its biological activities and health benefits[J]. *Pharmacological Research*, 2018, 136: 1–20.
- [3] CHENG J R, EROGLU A. The promising effects of astaxanthin on lung diseases[J]. *Advances in Nutrition*, 2021, 12(3): 850–864.
- [4] YANG L, GU J Y, LUAN T L, et al. Influence of oil matrixes on stability, antioxidant activity, bioaccessibility and bioavailability of astaxanthin ester[J]. *Journal of the Science and Food Agriculture*, 2021, 101(4): 1609–1617.
- [5] YANG L, LI F, CAO X Y, et al. Stability and bioavailability of protein matrixen-capsulated astaxanthin ester microcapsules[J]. *JSFA Reports*, 2022, 102(5): 2144–2152.
- [6] QIAO X, YANG L, GAO Q. Oxidation evaluation of free astaxanthin and astaxanthin esters in Pacific white shrimp during iced storage and frozen storage[J]. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, 2019, 99(5): 2226–2235.
- [7] MIAO F P, LU D Y, LI Y G, et al. Characterization of astaxanthin esters in *Haematococcus pluvialis* by liquid chromatography-atmospheric pressure chemical ionization mass spectrometry[J]. *Animal Biochemistry*, 2006, 352(2): 176–181.
- [8] 王钧艺, 闫研, 金辉东, 等. 虾青素复合添加剂对蛋鸡生产性能、蛋品质、蛋黄抗氧化指标和蛋黄中虾青素含量的影响[J]. *动物营养学报*, 2018, 30(7): 2700–2706. [WANG J Y, YAN Y, JIN H D, et al. Effects of astaxanthin compound additive on performance, egg quality, yolk antioxidant indexes and yolk astaxanthin content of laying hens[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2018, 30(7): 2700–2706.]
- [9] RAZA S H A, NAQVI S R Z, ABDELNOUR S A, et al. Beneficial effects and health benefits of Astaxanthin molecules on animal production: A review[J]. *Research in Veterinary Science*, 2021, 138: 69–78.
- [10] WALKER L A, WANG T, XIN H W, et al. Supplementation of laying-hen feed with palm tocos and algae astaxanthin for egg yolk nutrient enrichment[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, 60(8): 1989–1999.
- [11] GAO S, LI R H, HENG N, et al. Effects of dietary supplementation of natural astaxanthin from *Haematococcus pluvialis* on antioxidant capacity, lipid metabolism, and accumulation in the egg yolk of laying hens[J]. *Poultry Science*, 2020, 99(11): 5874–5882.
- [12] 贺维朝, 王浩, 张会艳, 等. 饲料添加虾青素对 69~74 周龄蛋鸡生产性能、蛋品质、抗氧化能力、生殖激素和卵泡数量的影响[J]. *动物营养学报*, 2022, 34(4): 2383–2392. [HE W C, WANG H, ZHANG H Y, et al. Effects of dietary astaxanthin on performance, egg quality, antioxidant capacity, reproductive hormone and follicle number of laying hens from 69 to 74 weeks of age[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2022, 34(4): 2383–2392.]

- [13] 张玉凤, 王恰, 吴永艳, 等. 蛋黄凝胶特性影响因素及改善方法研究进展[J]. *食品与机械*, 2021, 37(5): 187-193. [ZHANG Y F, WANG Y, WU Y Y, et al. Research progress on the factors affecting the characteristics of egg yolk gel and its modification[J]. *Food & Machinery*, 2021, 37(5): 187-193.]
- [14] MARCET I, DELGADO J, DÍAZ N, et al. Peptides recovery from egg yolk lipovitellins by ultrafiltration and their *in silico* bioactivity analysis[J]. *Food Chemistry*, 2022, 379: 132145.
- [15] KLENSPORF P D, ALADEDUNYE F, PRZYBYLSKI R. Storage stability of DHA in enriched liquid eggs[J]. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2018, 120(5): 1700164.
- [16] DANSOU D M, WANG H, NUGROHO R D, et al. Assessment of response to moderate and high dose supplementation of astaxanthin in laying hens[J]. *Animals (Basel)*, 2021, 11(4): 1138-1153.
- [17] 王瑶瑶, 吴凡, 叶根军, 等. 不同加热条件对 ω -3鸡蛋中脂肪酸含量的影响[J]. *食品科学技术学报*, 2021, 3: 111-121. [WANG Y Y, WU F, YE G J, et al. Effect of different heating conditions on fatty acids content in ω -3 eggs[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2021, 3: 111-121.]
- [18] BRODKORB A, EGGER L, ALMINGER M, et al. INFOGEST static *in vitro* simulation of gastrointestinal food digestion[J]. *Nature Protocols*, 2019, 14(4): 991-1014.
- [19] HUR S, KIM Y, CHOI I, et al. The effects of biopolymer encapsulation on total lipids and cholesterol in egg yolk during *in vitro* human digestion[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2013, 14(8): 16333-16347.
- [20] BRADFORD M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein[J]. *Analytical Biochemistry*, 1976, 72(1): 248-254.
- [21] WANG X F, QIU N, LIU Y P. Effect of different heat treatments on *in vitro* digestion of egg white proteins and identification of bioactive peptides in digested products[J]. *Journal of Food Science*, 2018, 83(4): 1140-1148.
- [22] HENG N, GAO S, GUO Y, et al. Effects of supplementing natural astaxanthin from *Haematococcus pluvialis* to laying hens on egg quality during storage at 4 °C and 25 °C[J]. *Poultry Science*, 2020, 99(12): 6877-6883.
- [23] 康雪帆, 李海明, 陈丹洁, 等. 糖接枝玉米醇溶蛋白包埋虾青素[J]. *食品科学*, 2018, 39(7): 168-173. [KANG X F, LI H M, CHEN D J, et al. Encapsulation of astaxanthin in zein-saccharide graft reaction products[J]. *Food Science*, 2018, 39(7): 168-173.]
- [24] 张晨曦, 张晓荣, 吕晨艳, 等. 超声辅助法制备铁蛋白-虾青素包埋物[J]. *食品科学*, 2021, 42(11): 94-101. [ZHANG C X, ZHANG X R, LU C Y, et al. Ultrasound-assisted encapsulation of astaxanthin within ferritin nanocages with enhanced efficiency[J]. *Food Science*, 2021, 42(11): 94-101.]
- [25] XU A X, WEST E A L, NASR P, et al. Structural properties of egg yolks modify *in-vitro* lipid digestion[J]. *Food Biophysics*, 2022, 17(1): 93-105.
- [26] LEEB E, GOTZ A, LETZEL T, et al. Influence of denaturation and aggregation of beta-lactoglobulin on its tryptic hydrolysis and the release of functional peptides[J]. *Food Chemistry*, 2015, 187: 545-554.
- [27] TUNICK M H, REN D X, VANHEKKEN D L, et al. Effect of heat and homogenization on *in vitro* digestion of milk[J]. *Journal of Dairy Science*, 2016, 99(6): 4124-4139.
- [28] AVANZA M, ACEVEDO B, CHAVES M, et al. Nutritional and anti-nutritional components of four cowpea varieties under thermal treatments: Principal component analysis[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2013, 51(1): 148-157.
- [29] 贺光祖, 肖昊, 印遇龙, 等. 肠道小肠吸收利用机制及其营养功能[J]. *动物营养学报*, 2015, 27(4): 1047-1054. [HE G Z, XIAO H, YIN Y L, et al. Peptide absorption and utilization and its nutritional functions in intestine[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2015, 27(4): 1047-1054.]
- [30] ANTON M. Egg yolk: Structures, functionalities and processes[J]. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, 2015, 93(12): 2871-2880.
- [31] 肖静, 朱倩, 叶鸿亮, 等. 蛋黄液热凝胶的质构特性研究[J]. *成都大学学报(自然科学版)*, 2019, 38(2): 155-158, 198. [XIAO J, ZHU Q, YE H L, et al. Study on texture characteristics of liquid egg yolk[J]. *Journal of Chengdu University (Natural Science)*, 2019, 38(2): 155-158, 198.]
- [32] NIMALARATNE C, SAVARD P, GAUTHIER S F, et al. Bioaccessibility and digestive stability of carotenoids in cooked eggs studied using a dynamic *in vitro* gastrointestinal model[J]. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 2015, 63(11): 2956-2962.