

DHA 营养强化鸡蛋研究进展

张秋芳^{1,2}, 王姿颐², 沈晓芳²

(1. 淄博市检验检测计量研究总院, 山东 淄博 255199; 2. 江南大学 食品学院, 江苏 无锡 214122)

摘要: DHA 能有效促进大脑发育、改善视力、预防心血管系统疾病等, 但在人体内的生成量不能满足需求, 需要靠食物获得。开发 DHA 营养强化鸡蛋, 可以为人们获取足量、廉价、优质的 DHA 提供有效途径。为了加强对 DHA 营养强化鸡蛋的研发, 推动其进一步发展, 从 DHA 的生理功能视角出发, 分析了 DHA 营养强化鸡蛋开发优势、饲料脂肪酸对鸡蛋中 DHA 的调控机制, 阐述了 DHA 营养强化鸡蛋的脂质组成、饲料中 DHA 的来源及鸡蛋中 DHA 的稳定性。富含 DHA 的日粮可生产富集 DHA 的鸡蛋, 且蛋黄中的 DHA 具有较高的稳定性, 同时 DHA 营养强化鸡蛋食用方便、便于保存, 且价格相对低廉, 因此 DHA 营养强化鸡蛋具有广阔的发展前景。

关键词: DHA; 鸡蛋; 脂质组成; 脂肪酸; 调控机制

中图分类号: TS253.1; TS201.4 文献标识码: A 文章编号: 1003-7969(2023)01-0098-06

Research progress on DHA fortified eggs

ZHANG Qiufang^{1,2}, WANG Ziyi², SHEN Xiaofang²

(1. Zibo Institute of Inspection, Testing and Metrology, Zibo 255199, Shandong, China;

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

Abstract: Docosahexaenoic acid (DHA) is effective in promoting brain development, improving vision and preventing cardiovascular system diseases, but its production in the human body does not meet the demand and needs to be obtained from food. The development of DHA fortified eggs can provide an effective way for people to obtain sufficient, cheap and high-quality DHA. To strengthen the research and promote further development, the advantages of DHA fortified eggs and the regulation mechanism of feed fatty acids to DHA were analyzed from the perspective of physiological function of DHA. In addition, the lipid composition of DHA fortified eggs, sources of DHA in feed, and the stability of DHA in eggs were described. DHA-enriched diets can produce DHA-enriched eggs, and the DHA in the yolk has high stability. DHA fortified eggs provide convenience for consumption, storage and saving costs, so DHA fortified eggs have a wide range of development prospects.

Key words: DHA; egg; lipid composition; fatty acid; regulation mechanism

DHA, 即二十二碳六烯酸, 俗称“脑黄金”, 是 $\omega-3$ 系列的长链多不饱和脂肪酸($\omega-3$ PUFA), 为人体大脑的主要组成物质之一, 占人脑脂质的 10% 左右^[1], 在视网膜的磷脂中所占比例最大, 约占 50%。DHA 在体内可由 α -亚麻酸(ALA)转化而

成, 但生成量较低, 需要依靠食物补充^[2]。研究发现, 鸡蛋蛋黄中的脂肪酸组成和含量与蛋鸡饲料的脂肪酸组成和含量密切相关, 蛋鸡采食富含 DHA 源的日粮能生产富含 DHA 的鸡蛋, 且鸡蛋中的 DHA 具有较高的稳定性^[3]。鸡蛋富含卵磷脂和多种维生素、微量元素, 是理想的蛋白质来源, 并且蛋黄中的 DHA 在人体内吸收转化率高, 通过改变日粮的组成增加鸡蛋中 DHA 含量是 DHA 供给持续而稳定的途径, 也是当前动物营养和功能性食品的研究热点之一。为了加强对 DHA 营养强化鸡蛋研发的关注和重视, 推动其进一步发展, 本文对 DHA 的生理功

收稿日期: 2021-08-16; 修回日期: 2022-06-15

基金项目: 淄博市重点研发计划项目(2020XCJS0008)

作者简介: 张秋芳(1987), 女, 高级工程师, 硕士, 研究方向为食品药品安全(E-mail) zqfang1234@163.com。

通信作者: 沈晓芳, 教授(E-mail) xfshen@jiangnan.edu.cn。

能、DHA 营养强化鸡蛋开发优势、饲料脂肪酸对鸡蛋中 DHA 的调控机制、DHA 营养强化鸡蛋的脂质组成等进行了阐述。

1 DHA 的生理功能

DHA 主要存在于大脑灰质中的脑神经细胞膜,对婴儿中枢神经系统、神经元树状突和突触、视网膜细胞等的形成和发育有重要作用^[4-7]。DHA 对成年人也具有重要的保健作用,如:可以降低血清总胆固醇及低密度脂蛋白胆固醇水平,抑制内源性总胆固醇和甘油三酯合成与代谢基因的表达^[8-9];减少血栓形成,预防心血管疾病^[10];参与合成脂蛋白,降低血液黏稠度^[11-12]。此外, DHA 在免疫调控^[13-15]、抗炎^[16-18]以及预防前列腺癌、乳腺癌、结肠癌、子宫癌等方面也发挥着积极作用^[19-22]。

2 DHA 营养强化鸡蛋开发优势

目前人们已经认识到 DHA 对人体健康的显著

功效,然而我国居民从膳食中获得 DHA 的量仅约 22.1 mg/d^[23],远低于中国营养学会推荐的摄入量(见表 1)。目前,国内 DHA 产品的开发主要集中在保健品^[24]、婴幼儿配方奶粉^[25]以及糖果^[26]、饼干^[27]等休闲食品中,但这些产品在生产过程中 DHA 容易氧化,且价格比较昂贵。鸡蛋不仅是理想的蛋白质来源,还含有丰富的脂质,以及多种维生素与微量元素,由于其廉价、多产、营养丰富且食用简单等优点,已成为人们日常饮食的重要部分^[28-29]。鸡蛋中的 $\omega-3$ PUFA 稳定性较高,在蛋鸡日粮中添加富含 $\omega-3$ PUFA 的原料会增加蛋黄中 $\omega-3$ PUFA 的含量,且与 ALA 相比 DHA 会优先沉积^[30]。因此,通过在蛋鸡日粮中添加 $\omega-3$ PUFA 生产 DHA 营养强化鸡蛋可成为人们获取 DHA 的重要途径之一^[31]。

表 1 不同地区和机构对 DHA 的推荐摄入量

机构名称	针对人群	脂肪酸	推荐摄入量	参考文献
中国营养学会	孕妇及哺乳期妇女	DHA	200 mg/d	[32]
	0~3岁婴幼儿	DHA	100 mg/d	
	健康成人	DHA	250~2 000 mg/d	
世界卫生组织及世界粮农组织	孕妇及哺乳期妇女	EPA + DHA	300 mg/d	[33]
		DHA	200 mg/d	
	0~6个月婴儿	DHA	总能量的 0.1%~0.18%	
	6~24个月婴儿	DHA	10~12 mg/kg(以体质量计)	
	2~4岁儿童	EPA + DHA	100~150 mg/d	
	4~6岁儿童	EPA + DHA	150~200 mg/d	
	6~10岁儿童	EPA + DHA	200~250 mg/d	
健康成人	EPA + DHA	男性 250 mg/d,女性 300 mg/d		
		DHA	200 mg/d	
欧盟食品安全局	孕妇及哺乳期妇女	DHA	100~200 mg/d	[34]
	0~6个月婴儿	DHA	50~100 mg/d	
	6~24个月婴儿	DHA	100 mg/d	
	2~18岁儿童及青少年	EPA + DHA	250 mg/d	
	健康成人	EPA + DHA	250 mg/d	
美国国家卫生院	孕妇及哺乳期妇女	DHA	300 mg/d	[35]
	婴幼儿	DHA	脂肪酸的 0.35%	
	健康成人	DHA	220 mg/d	

3 饲料脂肪酸对鸡蛋中 DHA 的调控机制

ALA 在蛋鸡体内向 DHA 转化的途径类似于人类(见图 1)。ALA 经过系列反应首先转化为 EPA,再进一步转化为 DHA,但通常转化率较低^[36]。 $\Delta 6$ 去饱和酶是整个转化过程中的限速酶,ALA 转化为

EPA 以及 LA 转化为 AA 都需要 $\Delta 6$ 去饱和酶,它们之间存在竞争, $\omega-3$ PUFA 与 $\Delta 6$ 去饱和酶的亲和力远大于 $\omega-6$ PUFA,因此在蛋鸡日粮中添加 $\omega-3$ PUFA 可使蛋黄中 $\omega-3$ PUFA 不断沉积,并抑制 $\omega-6$ PUFA 的转化^[37],有效富集 $\omega-3$ PUFA。

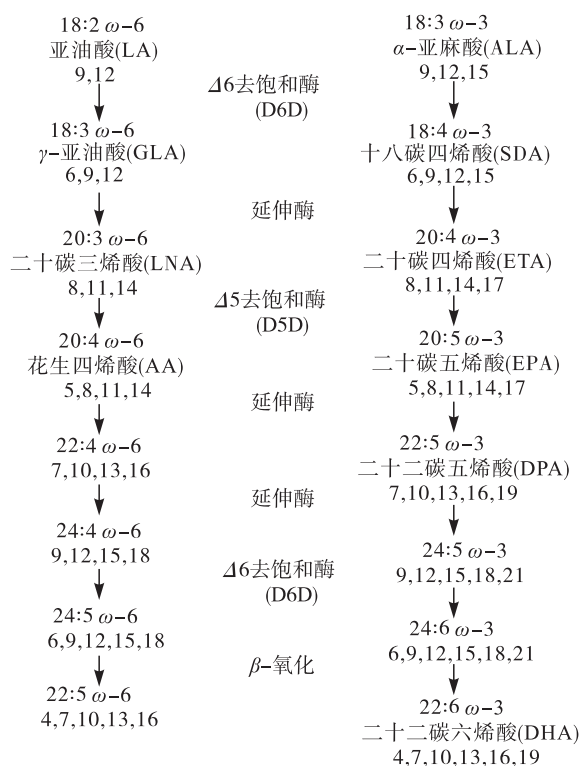


图1 ω -3 PUFA 和 ω -6 PUFA 的转化途径(参考文献[38]整理)

4 DHA 营养强化鸡蛋脂质组成

鸡蛋中总脂肪含量为 30% ~ 33%, 且 99% 以上的脂质存在于蛋黄中, 可分为甘油三酯(中性脂)、磷脂和胆固醇, 分别占总脂质的 62.3%、32.8%、4.9%^[39]。不同品种鸡蛋的脂质和脂肪酸组成具有显著差异, 主要受遗传、日粮以及鸡龄影响。由于鸡蛋中饱和脂肪酸和胆固醇的含量较高, 生产高 PUFA 和低胆固醇含量的鸡蛋已成为研究者追求的重要目标^[40]。蛋黄中饱和脂肪酸和单不饱和脂肪酸含量受日粮影响较小, 而 85% EPA 和 78% DHA 来自于日粮^[31]。李子睦等^[41]对比了 DHA 营养强化鸡蛋与普通鸡蛋蛋黄的脂质组成, 发现 DHA 营养强化鸡蛋的总脂质和磷脂含量与普通鸡蛋无显著差异, 而 DHA 含量(11.14%)远超普通鸡蛋(0.14%), 且 DHA 营养强化鸡蛋具有更佳的 ω -6/ ω -3 比值。赵英才等^[42]通过对 4 种不同品牌市售 DHA 营养强化鸡蛋抽样测试发现, 鸡蛋的 DHA 含量为 111.79 ~ 313.59 mg/100 g, ω -6/ ω -3 比值范围为 1.27 ~ 9.92。另外, DHA 营养强化鸡蛋富含卵磷脂型 DHA, 卵磷脂型 DHA 在人体内分解为 DHA 和卵磷脂, 因此食用 DHA 营养强化鸡蛋可以同时补充 DHA 和卵磷脂。

5 蛋鸡饲料中 DHA 的来源

5.1 鱼油

深海鱼油是 DHA 的主要来源之一, 金枪鱼油中

DHA 含量高达 26% ~ 37%, 鲑鱼油中 DHA 含量为 18%, 它们作为蛋鸡饲料来源可直接在鸡蛋中沉积 DHA^[43]。Van Elswyk 等^[44]研究发现, 在蛋鸡饲料中添加 3% 的鱼油, 蛋黄中 DHA 含量增长到 356%。但由于产地、季节、品种、部位等因素影响, 鱼油中 DHA 含量不稳定、风味不佳、产品成本较高。受海洋环境日益恶化和食物链传递影响, 鱼油中重金属汞和有机物污染的问题备受重视^[45]。

5.2 海藻类

海藻类植物具有 DHA 含量高、生长速度快、生产简单等优点^[46]。在蛋鸡饲料中通常用海藻类植物来代替鱼油补充饲料中的 DHA。同时, 海藻类植物还含有角黄素和 β -胡萝卜素, 可为母鸡补充相应的营养成分, 提亮蛋黄颜色^[47]。我国水产资源丰富, 目前市场上海藻类植物相对比较充足。裂壶藻 (*Schizochytrium* sp.)、吾肯氏壶藻 (*Ulkenia amoeboida*) 和寇氏隐甲藻 (*Cryptocodinium cohnii*) 已被批准作为新资源食品生产 DHA 藻油, 并允许将其生产的 DHA 藻油添加到婴幼儿配方食品中^[48]。因此, 通过在蛋鸡饲料中添加海藻类植物提高和补充饲料中的 DHA, 进而生产出富含 DHA 的鸡蛋, 具有一定的发展优势和基础资源。

5.3 亚麻籽

市场上鱼油和藻油的价格比较昂贵, 一定程度上增加了 DHA 营养强化鸡蛋的培育成本。亚麻籽富含多不饱和脂肪酸, 亚麻籽油中 ALA 含量高达 50% ~ 60%, 是目前蛋鸡养殖过程中所需的重要植物性饲料^[49-50]。研究发现, 给蛋鸡喂食含有 ALA 的饲料也能够生产出富集 DHA 的鸡蛋。沈勇等^[51]给蛋鸡饲喂含 6%、10% 亚麻籽的饲料后蛋黄中 DHA 平均含量较对照组分别提高 73.78% 和 67.54%, 且 6% 亚麻籽组效果优于 10% 亚麻籽组。Scheideler 等^[52]在蛋鸡日粮中添加 5% 的亚麻籽饲喂 56 d 后, 鸡蛋中 DHA 含量达到最高水平, 沉积率为 1.81%。但家禽将 ALA 转变为 EPA 和 DHA 的速度很慢, 且日粮中 ω -6/ ω -3 比值越高, 转变越慢, 因此尽管 ALA 是 EPA 和 DHA 的前体物质, 但在家禽体内 ALA 转换为 DHA 的效率不高^[53]。目前想获得富集较高水平 DHA 的鸡蛋, 可能需要考虑与鱼油或海藻搭配才能实现^[54]。

6 营养强化鸡蛋中 DHA 的稳定性

DHA 含有 6 个不饱和键, 容易氧化产生过氧化物, 过氧化物一旦进入人体后, 就会氧化细胞膜中的

脂质,破坏细胞的正常结构,加速机体衰老^[55]。DHA 营养强化鸡蛋在外观、烹饪、味道及贮存期方面与普通鸡蛋相似。有研究证明,不同的烹调加工方法(煮鸡蛋、半熟蛋、炒鸡蛋、煎蛋)和保存方法几乎不会对富集在蛋黄中的 DHA 造成损伤^[56]。关于鸡蛋内 DHA 稳定的机制有多种解释:其一,因为在蛋黄低密度脂蛋白分子的外部,蛋白质和磷脂构成交联结构,使氧分子不能进入低密度脂蛋白内部,从而保护了低密度脂蛋白内部的 DHA 免遭氧化;其二,蛋黄中的卵黄高磷蛋白可螯合蛋黄中的铁离子,从而防止铁离子作为电子传递介质促进 DHA 的氧化;其三,蛋黄中过氧化物的生成速度和分解速度相同,从而可以保持蛋黄中过氧化物含量的稳定^[55]。因此,鸡蛋是使 DHA 得到稳定保存的良好介质^[57]。

7 DHA 营养强化鸡蛋应用前景

近年来,富含 DHA 的食品已成为消费者的关注热点,据估计每人每天食用 1~2 个 DHA 营养强化鸡蛋即可满足 DHA 正常需要量,因此开发 DHA 营养强化鸡蛋对居民健康水平及蛋鸡行业的发展都具有重要意义。然而,DHA 营养强化鸡蛋存在一些问题尚待解决:①DHA 含量。目前商品标识 DHA 含量从几十到两百甚至三百多毫克每百克,而实测值是否与标识值一致将是市场监管方面的重点。团体标准《DHA 营养强化鸡蛋》^[58]将 DHA 营养强化鸡蛋根据 DHA 含量分为 A 级、AA 级和 AAA 级 3 个等级,将有助于规范 DHA 营养强化鸡蛋中的 DHA 含量。②DHA 营养强化鸡蛋的口感。常温下 DHA 是以液体形态存在的,呈无色透明状,略带有腥味,口感不佳。由于 DHA 源不同,有的鸡蛋在外源添加量高时会出现令人不悦的气味,影响产品的食味值。③DHA 的沉积效率或转化效率问题。日粮中 ALA 和 EPA 向鸡蛋中 DHA 的转化以及日粮中 DHA 在鸡蛋中的沉积,受去饱和酶的竞争、蛋鸡周龄、蛋鸡品种,甚至鸡舍温度和湿度等因素影响。④价格因素。虽然 DHA 对人体健康至关重要,但由于 DHA 源在饲料中的添加增加了饲料成本,加之转化率偏低使添加量较大,以及商业运作,使 DHA 营养强化鸡蛋价格是普通鸡蛋的几倍,对于多数消费者而言,市售 DHA 营养强化鸡蛋的价格较难接受。

在鸡蛋中融入 DHA,不仅可以保证 DHA 的稳定性,又便于保存、食用方便,且价格相对低廉。加强 DHA 营养强化鸡蛋的研究,推动 DHA 营养强化鸡蛋的生产与发展,对于改善当前人们 DHA 摄入不足的现状以及提高全民健康水平具有重要意义,是

未来 DHA 市场的重要开发方向之一,具有广阔的发展前景。

参考文献:

- [1] 兰廷锋,傅志远. DHA 复合添加剂在蛋鸡养殖上的应用[J]. 福建畜牧兽医, 2013, 35(6):32-34.
- [2] SWANSON D, BLOCK R, MOUSA S A, et al. Omega-3 fatty acids EPA and DHA: health benefits throughout life [J]. Adv Nutr, 2012, 3(1):1-7.
- [3] CHERIAN G, GONZALEZ D, RYU K S, et al. Long-term feeding of conjugated linoleic acid and fish oil to laying hens: effects on hepatic histopathology, egg quality, and lipid components [J]. J Appl Poultry Res, 2007, 16(3): 420-428.
- [4] WANG D D, WU F, WEN M, et al. Replenishment of docosahexaenoic acid (DHA) in dietary n-3-deficient mice fed DHA in triglycerides or phosphatidylcholines after weaning [J]. J Food Sci, 2018, 83(2): 481-488.
- [5] ECHEVERRIA F, VALENZUELA R, HERNANDEZ-RODAS M C, et al. Docosahexaenoic acid (DHA), a fundamental fatty acid for the brain: new dietary sources [J]. Prostag Leukotr Ess, 2017, 124: 1-10.
- [6] SHINDOU H, KOSO H, SASAKI J, et al. Docosahexaenoic acid preserves visual function by maintaining correct disc morphology in retinal photoreceptor cells [J]. J Biol Chem, 2017, 292(29): 12054-12064.
- [7] 陈涛,向红莉,张配,等. 含 DHA 藻油的大豆调和油对 SD 大鼠大脑皮层和视网膜形态结构的影响 [J]. 中国油脂, 2017, 42(7): 124-127, 149.
- [8] BAHETY P, NGUYEN T H V, HONG Y J, et al. Understanding the cholesterol metabolism - perturbing effects of docosahexaenoic acid by gas chromatography-mass spectrometry targeted metabolomic profiling [J]. Eur J Nutr, 2017, 56(1): 29-43.
- [9] PINCON A, COULOMBE J D, CHOUINARD-WATKINS R, et al. Human apolipoprotein E allele and docosahexaenoic acid intake modulate peripheral cholesterol homeostasis in mice [J]. J Nutr Biochem, 2016, 34: 83-88.
- [10] LARSON M K, TORMOEN G W, WEAVER L J, et al. Exogenous modification of platelet membranes with the omega-3 fatty acids EPA and DHA reduces platelet procoagulant activity and thrombus formation [J]. Am J Physiol - Cell Physiol, 2013, 304(3): C273-C279.
- [11] KIMURA S, TAMAYAMA M, MINAMI M, et al. Docosahexaenoic acid inhibits blood viscosity in stroke-prone spontaneously hypertensive rats [J]. Res Commun Mol Pathol Pharmacol, 1998, 100(3): 351-361.
- [12] SIMOPOULOS A P. Omega-3 fatty acids and athletics [J]. Curr Sport Med Rep, 2007, 6(4): 230-236.

- [13] GAO Y, SU J, ZHANG Y B, et al. Dietary DHA amplifies LXA(4) circuits in tissues and lymph node PMN and is protective in immune-driven dry eye disease[J]. *Mucosal Immunol*, 2018, 11(6): 1674–1683.
- [14] RICHARD C, LEWIS E D, GORUK S, et al. A dietary supply of docosahexaenoic acid early in life is essential for immune development and the establishment of oral tolerance in female rat offspring[J]. *J Nutr*, 2016, 146(11): 2398–2406.
- [15] RICHARD C, LEWIS E D, GORUK S, et al. The content of docosahexaenoic acid in the maternal diet differentially affects the immune response in lactating dams and suckled offspring[J]. *Eur J Nutr*, 2016, 55(7): 2255–2264.
- [16] CALDER P C. Marine *omega*-3 fatty acids and inflammatory processes: effects, mechanisms and clinical relevance[J]. *Biochim Biophys Acta Mol Cell Biol Lipids*, 2015, 1851(4): 469–484.
- [17] VALENTINE C J, DINGESS K A, KLEIMAN J, et al. A randomized trial of maternal docosahexaenoic acid supplementation to reduce inflammation in extremely preterm infants[J]. *J Pediatr Gastroenterol Nutr*, 2019, 69(3): 388–392.
- [18] ALLAM-NDOUL B, GUENARD F, BARBIER O, et al. Effect of *n*-3 fatty acids on the expression of inflammatory genes in THP-1 macrophages[J]. *Lipids Health Dis*, 2016, 15: 1–7.
- [19] JIAO Y, WATTS T, XUE J, et al. Sorafenib and docosahexaenoic acid act in synergy to suppress cancer cell viability: a role of heme oxygenase 1[J]. *BMC Cancer*, 2018, 18: 1–10.
- [20] YAO Y Y, GUO Q L, CAO Y, et al. Artemisinin derivatives inactivate cancer-associated fibroblasts through suppressing TGF- β signaling in breast cancer[J]. *J Exp Clin Cancer Res*, 2018, 37: 1–14.
- [21] GENG L J, ZHOU W, LIU B, et al. DHA induces apoptosis of human malignant breast cancer tissues by the TLR-4/PPAR- α pathways[J]. *Oncol Lett*, 2018, 15(3): 2967–2977.
- [22] NEWELL M, BAKER K, POSTOVIT L M, et al. A critical review on the effect of docosahexaenoic acid (DHA) on cancer cell cycle progression[J]. *Int J Mol Sci*, 2017, 18(8): 1–14.
- [23] 张坚, 孟丽苹, 姜元荣, 等. 中国成人膳食脂肪酸摄入和食物来源状况分析[J]. *营养学报*, 2009, 31(5): 424–427.
- [24] 周洪, 魏凤, 邓阿妹, 等. 基于专利分析的藻油 DHA 技术发展研究[J]. *中国油脂*, 2017, 42(11): 1–7.
- [25] 杨晓波. DHA 在婴幼儿奶粉中的应用技术专利分析[J]. *科技创新与应用*, 2020(21): 23–24.
- [26] 王漫. DHA 在凝胶糖果中稳定性的研究[J]. *农产品加工*, 2018(15): 16–18.
- [27] 夏炜. 富含 DHA 曲奇饼干的研制[J]. *中国食品*, 2021(8): 96–99.
- [28] SELL J L, CHOO S H, KONDRÁ P A. Fatty acid composition of egg yolk and adipose tissue as influenced by dietary fat and strain of hen[J]. *Poultry Sci*, 1968, 47(4): 1296–1302.
- [29] 国家统计局. 2018 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [30] 杨蕊, SHIN J S, 刘玉海, 等. 饲料中添加微藻 DHA 和 ALA 对蛋黄脂肪酸构成及蛋黄胆固醇、三酰甘油的影响[J]. *饲料研究*, 2014(21): 11–14, 64.
- [31] BAUCCELLS M D, CRESPO N, BARROETA A C, et al. Incorporation of different polyunsaturated fatty acids into eggs[J]. *Poult Sci*, 2000, 79(1): 51–59.
- [32] 中国营养学会. 中国居民膳食营养素参考摄入量速查手册(2013 版)[M]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [33] FAO R. Fats and fatty acids in human nutrition: report of an expert consultation, 10–14 November 2008, Geneva [M]. Rome, Italy: Food and Agriculture Organizations, 2010.
- [34] AUTHORITY E F S. Outcome of the public consultation on the draft opinion of the scientific panel on dietetic products, nutrition, and allergies (NDA) on establishing dietary reference values for water [J/OL]. *EFSA J*, 2010, 8(3): 1505 [2011-08-16]. <https://efsa.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2903/j.efsa.2010.1506>.
- [35] SIMOPOULOS A P, LEAF A, SALEM N. Workshop statement on the essentiality of and recommended dietary intakes for *omega*-6 and *omega*-3 fatty acids[J]. *Prostag Leukotr Ess*, 2000, 63(3): 119–121.
- [36] FRAEYE I, BRUNEEL C, LEMAHIEU C, et al. Dietary enrichment of eggs with *omega*-3 fatty acids: a review[J]. *Food Res Int*, 2012, 48(2): 961–969.
- [37] 吴永保. 利用拟微绿球藻 (*Nannochloropsis* sp.) 生产富含 *n*-3 PUFA 鸡蛋及其机理研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2017.
- [38] WU M T, SU H M, CUI Y, et al. Fucoxanthin enhances chain elongation and desaturation of *alpha*-linolenic acid in HepG2 cells[J]. *Lipids*, 2015, 50(10): 945–953.
- [39] STADELMAN W J, COTTERILL O J. Egg science and technology[M]. 4th ed. New York: Routledge, 2018.
- [40] 张蓉, 尚以顺, 吴佳海, 等. 鸡蛋脂肪酸组成营养调控的

- 研究进展[J]. 江苏农业科学, 2019,47(21): 67-71.
- [41] 李子睦,宗蕾,毕艳兰,等. DHA营养强化鸡蛋与普通鸡蛋蛋黄脂质组成对比分析[J]. 中国油脂,2021,46(2):36-40,47.
- [42] 赵英才,于竹林,李榕,等. 二十二碳六烯酸营养强化鸡蛋及蛋黄粉中脂质分析[J]. 食品安全质量检测学报,2019,10(15):250-255.
- [43] 付兴周,路志芳,申海燕,等. 富集DHA鸡蛋的研究进展[J]. 中国家禽,2016,38(9):41-44.
- [44] VAN ELSWYK M E, SAMS A R, HARGIS P S. Composition, functionality, and sensory evaluation of egg from hen fed dietary menhaden oil[J]. J Food Sci, 1992(57):342-344.
- [45] 陈殊贤,郑晓辉. 微藻油和鱼油中DHA的特性及应用研究进展[J]. 食品科学,2013,34(21):439-444.
- [46] SPOLAORE P, JOANNIS - CASSAN C, DURAN E, et al. Commercial applications of microalgae[J]. J Biosci Bioeng, 2006, 101(2): 87-96.
- [47] JENSEN C L, MAUREEN M, ANDERSON R E, et al. Effect of docosahexaenoic acid supplementation of lactating women on the fatty acid composition of breast milk lipids and maternal and infant plasma phospholipids[J]. Am J Clin Nutr, 2000, 71(1 Suppl): 292-299.
- [48] 龙烁,王浩,武书庚,等. 二十二碳六烯酸的生理学功能及其在家禽生产中的应用[J]. 动物营养学报, 2017,29(4):1101-1109.
- [49] 赵丹阳. 亚麻籽对北京油鸡生长性能、肉品质和 $n-3$ PUFA 沉积规律的影响研究[D]. 北京:中国农业科学院,2020.
- [50] 王瑞元. 我国亚麻籽油的消费市场前景看好[J]. 中国油脂,2018,43(1):1-3.
- [51] 沈勇,王建发,郭丽,等. 亚麻籽对鸡蛋蛋黄中DHA和EPA含量的影响[J]. 营养学报,2012,34(1):50-54.
- [52] SCHEIDELER S E, FRONING G W. The combined influence of dietary flaxseed variety, level, form, and storage conditions on egg production and composition among vitamin E-supplemented hens[J]. Poultry Sci, 1996, 75(10): 1221-1226.
- [53] 汪鲲. $n-3$ 多不饱和脂肪酸在蛋黄和组织中的富集规律及其对产蛋鸡脂类代谢的影响[D]. 北京:中国农业科学院,2000.
- [54] 彭运智,谭会泽,梁灶红,等. 亚麻籽对鸡蛋中脂肪酸富集及蛋品质的影响[J]. 中国畜牧杂志,2021,57(1):149-152.
- [55] 李红燕,隋恒凤. $n-3$ 多不饱和脂肪酸强化蛋研究现状[J]. 草食家畜,2012(1):66-68.
- [56] 王文君,徐明生,欧阳克惠,等. $\omega-3$ 多不饱和脂肪酸在改善鸡蛋营养质量方面的研究[J]. 中国食品学报, 2003,3(1):82-85.
- [57] 高占峰,汪鲲,齐广海,等. 日粮 $n-3$ 多不饱和脂肪酸对蛋黄脂质稳定性的影响[J]. 中国饲料,2000(11):8-11.
- [58] 沈晓芳,王姿颐,张秋芳,等. DHA营养强化鸡蛋: T/SDAS 198—2020[S].
-
- (上接第86页)
- [5] PAN A, SUN Q, MANSON J E, et al. Walnut consumption is associated with lower risk of type 2 diabetes in women[J]. J Nutr,2013,143(4):512-518.
- [6] 郭从善. 核桃及其加工与利用[J]. 粮油食品科技,1999(7):23-25.
- [7] 刘警,于秋香,李扬,等. 我国核桃生产的现状、问题及发展对策[J]. 北方果树,2020,5(6):38-41.
- [8] “关于支持木本油料树种——核桃产业发展的建议”复文(2021年第4570号)[EB/OL]. (2021-11-22) [2022-09-18]. <https://www.forestry.gov.cn/main/4861/20211122/141242351123620.html>.
- [9] 2022年核桃行业发展前景及市场规模分析[EB/OL]. (2022-09-29) [2022-11-04]. <https://www.163.com/dy/article/HIEPMFFR05199FC8.html>.
- [10] 高端食用油及核桃油市场分析[EB/OL]. (2022-04-29) [2022-09-18]. <https://www.163.com/dy/article/H64RFHC605199FC8.html>.
- [11] 韦建圩. 薄壳山核桃种植现状与发展策略[J]. 广东蚕业,2021,55(9):32-33.
- [12] 罗自瑶,杨淑华,张秀花,等. 核桃采摘机械的研究现状及发展趋势[J]. 河北农机,2021(3):12-14.
- [13] 胡安鸿. 核桃商品化处理存在的问题及其对策[J]. 西北园艺(果树),2012(4):17-19.
- [14] 张永成,马佳乐,唐玉荣,等. 我国核桃初加工现状与分析[J]. 食品工业,2020,41(7):198-202.
- [15] 李忠新. 核桃加工产业的现状与展望[J]. 农产品加工,2014(8):32-33.
- [16] 陈俊奇. 核桃破壳机械研究现状的分析研究[D/OL]. [2022-09-18]. <https://max.book118.com/html/2014/0727/9182979.shtm>.
- [17] 裴东,郭宝光,李丕军,等. 我国核桃市场与产业调查分析报告[EB/OL]. (2020-10-10) [2022-09-18]. <https://mp.weixin.qq.com/s/0zUrtV41R2Hj69H6w-NQ>.
- [18] 王瑞元. 我国木本油料产业发展现状、问题及建议[J]. 中国油脂,2020,45(2):1-2,20.
- [19] 曲清莉. 采后干燥和保鲜处理对核桃品质的影响[D]. 济南:齐鲁工业大学,2016.
- [20] 王海燕. 核桃机械深加工工艺与关键技术研究[J]. 农业装备,2022,55(5):34-36.