



生物营养强化鸡蛋研究进展

余雅男, 马可涵, 杨佳, 韩昊洋, Dieudonné M. Dansou, 赵丽媛,
赵青余, 秦玉昌, 汤超华, 张军民*

中国农业科学院北京畜牧兽医研究所, 畜禽营养与饲养全国重点实验室, 北京 100193

* 联系人, E-mail: zhangjunmin@caas.cn

收稿日期: 2024-06-30; 接受日期: 2024-12-09; 网络版发表日期: 2025-02-26

国家蛋鸡产业技术体系项目(批准号: CARS-40-K11)、北京市家禽创新团队项目(批准号: BAIC06-2024-G05)、江苏省家禽遗传育种重点实验室开放课题(批准号: JQLAB-KF-202302)、中国农业科学院科技创新工程协同创新任务项目(批准号: CAAS-XTCX20190025-8)、中国农业科学院科技创新工程项目(批准号: ASTIP-IAS-12)和绿色食品(绿色优质农产品)畜禽产品营养功能强化与评价研究项目(批准号: GFJY20240014)资助

摘要 鸡蛋作为一种营养全面、全球居民接受度较高的食物之一, 在全球具有重要地位, 同时其作为营养素的有效载体, 可以通过调节蛋鸡日粮进而调控鸡蛋营养物质组成, 因此, 生物营养强化鸡蛋成为一种有巨大潜力的功能性食品. 我国居民宏量营养素摄入充足, 但是部分重点地区、重点人群, 如婴幼儿、育龄妇女和高龄老年人摄入的重要微量营养素仍旧缺乏, 而生物营养强化鸡蛋是解决这一问题的有效途径之一. 因此, 本文综述了 ω -3多不饱和脂肪酸(ω -3 PUFA)、维生素类(维生素A和叶酸等)、微量元素类(硒等)以及类胡萝卜素(虾青素和叶黄素)等生物营养强化鸡蛋生产的研究进展, 重点围绕营养素的生物活性功能及其生产方式, 以期生物营养强化鸡蛋生产提供科学依据.

关键词 生物营养强化鸡蛋, 多不饱和脂肪酸, 维生素, 微量元素, 类胡萝卜素

联合国粮食及农业组织资料显示, 全球约有将近20亿人正在遭受“隐性饥饿”, 我国“隐性饥饿”人口达3亿. 隐性饥饿是指机体由于营养不平衡或者缺乏某种营养素, 同时又存在其他营养成分过度摄入, 从而产生隐蔽性营养需求的饥饿症状^[1,2]. 隐性饥饿与慢性病息息相关. 《中国居民营养与慢性病状况报告(2020年)》显示, 我国居民宏量营养素摄入充足, 但是部分重点地区、重点人群, 如婴幼儿、育龄妇女和高龄老年人摄入的重要微量营养素仍旧缺乏. 《“健康中国2030”规划纲要》和《国民营养计划(2017—2030年)》

均指出要着力发展营养强化食品, 提升优质农产品的营养水平.

鸡蛋作为一种营养全面、全球居民喜爱度较高的食物之一, 在全球具有重要地位, 同时其作为营养素的有效载体, 可以通过调节蛋鸡日粮进而调控鸡蛋营养物质组成, 因此, 生物营养强化鸡蛋作为一种有巨大潜力的功能性食品备受关注. 随着人们对特定营养物质, 如 ω -3多不饱和脂肪酸(ω -3 PUFA)、维生素、矿物质以及抗氧化物质等的需求增加, 传统鸡蛋可能无法完全满足现代生活的营养需求, 因此, 生物营养强

引用格式: 余雅男, 马可涵, 杨佳, 等. 生物营养强化鸡蛋研究进展. 中国科学: 生命科学, 2025, 55: 489–507

Yu Y N, Ma K H, Yang J, et al. Research progress on biofortified chicken eggs (in Chinese). Sci Sin Vitae, 2025, 55: 489–507, doi: 10.1360/SSV-2024-0216

化鸡蛋成为解决这一问题的有效途径之一, 为消费者提供更多选择. 在国外, 加拿大消费市场上约17%的禽蛋产品为 ω -3 PUFA强化禽蛋, 且该类产品市场占有率呈现逐年上升的趋势^[3]. 美国是世界范围内功能性食品研究、开发、消费的大国, 功能性食品消费量约占总食品消费量的70%. 近几十年来, 功能性食品的需求逐渐增加, 预计将来会持续增长.

本文综述了 ω -3 PUFA、维生素类(维生素A和叶黄素等)、微量元素类(硒等)以及类胡萝卜素(虾青素和叶黄素)等生物营养强化鸡蛋生产的研究进展, 重点围绕营养素的生物活性功能及其生产方式, 以期生物营养强化鸡蛋产业提供科学依据.

1 ω -3 PUFAs生物营养强化鸡蛋

ω -3 PUFAs包括 α -亚麻酸(ALA)、十八碳四烯酸(SDA)、二十碳五烯酸(EPA)、二十二碳五烯酸(DPA)以及二十二碳六烯酸(DHA)^[4]. ω -3 PUFAs在治疗心血管疾病(如心房颤动、动脉粥样硬化、血栓形成、炎症和猝死等)、糖尿病、癌症、抑郁症和各种精神疾病、老年认知功能下降、牙周疾病和类风湿性关节炎等疾病中起到了积极作用^[5]. 有研究表明, ω -3 PUFAs与孕期母体健康和儿童健康息息相关. ω -3 PUFAs影响妊娠期长度、早产、出生体重、妊娠期高血压/子痫前期、神经发育、认知发育、孤独症谱系障碍、注意缺陷多动障碍、学习障碍、特应性皮炎、过敏和呼吸道等疾病^[5,6].

ALA可以通过链延长和脱饱和反应转化为EPA或DPA, 但是人体无法合成所有这些 ω -3 PUFAs, 需要从饮食摄入. 加拿大营养师协会(2013年)建议, ALA的所需水平因年龄和性别而异, 在1.1~1.6 g/d, 此外, 他们还推荐每周至少摄入鱼类食物, 从而每天提供约0.3~0.45 g的EPA和DHA. 联合国粮食及农业组织(FAO 2010)建议成人每天摄入0.5%~0.6%的ALA, 以预防 ω -3 PUFAs缺乏引起的症状, 总 ω -3 PUFAs摄入量应达到0.5%~2%. 《中国居民膳食营养素参考摄入量(2013版)》中 ω -3 PUFA的适宜摄入量(AI)为0.5%~2%, 以女性轻体力劳动能量计算(1800 kcal/d)为1.2 g/d; 12月龄内婴儿ALA推荐的适宜摄入量为: 500~510 mg/d, DHA推荐的适宜摄入量为100 mg/d. 而《柳叶刀》发布的全球饮食结构调查显示, 我国膳食中

ω -3 PUFA远未达到推荐摄入量. 加之我国不同膳食油脂差异很大, ω -3 PUFA的食物来源有限, 膳食摄入量普遍较低. 欧盟法规第116/2010号规定, 如果每100 g食品中至少含有0.3 g ALA或者含有40 mg EPA+DHA, 则被认为是 ω -3 PUFAs源食物; 如果每100 g食品中至少含有0.6 g ALA或者80 mg EPA+DHA, 则被认为是 ω -3 PUFAs强化食物. 2021年, 我国农业行业标准《 ω -3多不饱和脂肪酸强化鸡蛋》和《 ω -3多不饱和脂肪酸强化鸡蛋生产技术规范》发布, 其中规定了 ω -3 PUFAs强化鸡蛋中 ω -3 PUFAs的含量需大于等于300 mg/100 g鸡蛋可食部. 一枚普通鸡蛋中脂肪酸的组成见表1.

Cruickshank在1934年撰写了开创性论文, 阐述了日粮脂肪酸对家禽和鸡蛋中脂质组成的影响^[7]. 蛋鸡能够吸收和代谢来自日粮中的 ω -3 PUFAs, 并将其沉积到蛋黄中, 一方面直接从饲料中摄取沉积DHA等长链多不饱和脂肪酸, 另一方面从外源饲料获取ALA而后逐步转化生成EPA, DPA和DHA等长链多不饱和脂肪酸, 见图1. ω -3 PUFAs在鸡蛋内主要沉积于蛋黄, 沉积过程可概括为甘油三酯的形成、组装、运输、沉积等过程^[8]. 鸡蛋中的EPA和DHA, 主要以磷脂的形式沉积在蛋黄中.

利用日粮中 ω -3 PUFAs沉积到蛋黄中的优势, 能够生产ALA, EPA和DHA生物营养强化鸡蛋. 日粮中添加ALA源的 ω -3 PUFAs, 多为植物来源, 如菜籽、大豆、核桃和亚麻籽及其油脂等, 其中亚麻籽和亚麻籽油是一种高效的、价格合适的ALA源之一. 在过去几十年里, 已广泛研究了通过补充亚麻籽或亚麻籽油对鸡蛋中ALA富集的影响. 生物体内ALA转化为EPA和DHA的转化率相对有限, 因此通过日粮中添加鱼油或微藻, 可有效增加DHA在鸡蛋中的富集量. 但是, 生产实践发现, 蛋鸡日粮中添加高剂量的鱼油可以使鸡蛋中的DHA含量相对较高, 但是鱼油氧化产生的不良气味会影响鸡蛋风味. 此外, 富含 ω -3 PUFAs源的饲料添加剂被广泛开发, 如美藤果油、微藻油和橡胶籽油等. 表2^[9-23]总结了蛋鸡日粮中添加不同来源的 ω -3 PUFAs及其鸡蛋中 ω -3 PUFAs沉积情况.

不同富含 ω -3 PUFAs饲料添加剂之间不能简单地以添加量做比较, 诸多实验因素(蛋鸡品种和日龄、基础饲料、饲料配方等)都会影响结果. 因此, 在一个单一的研究中比较所有相关的 ω -3 PUFA来源(如亚麻

表 1 一枚普通鸡蛋中脂肪酸的组成^{a)}
Table 1 Fatty acid composition of a regular egg^{a)}

脂肪酸		鸡蛋 (红皮)	鸡蛋 (乌鸡蛋、绿皮)	鸡蛋	鸡蛋 (柴鸡)	鸡蛋 (肉鸡)	鸡蛋 (土鸡)	鸡蛋 (乌鸡)
脂肪酸 (g/100 g可食部)	Total	8.7	8.8	10.7	12.3	12.5	13.8	10.3
	饱和SPA	6.8	3.2	3.6	4.6	4.0	4.5	3.5
	单不饱和MUFA	1.8	5.2	5.0	5.6	6.3	6.9	4.6
	多不饱和PUFA	0.1	0.4	2.0	2.0	2.0	2.3	2.2
	未知	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.1	0.0
饱和脂肪酸/总脂肪酸 (%)	Total	78.5	36.1	34.0	37.8	32.1	32.5	34.3
	10:0	—	0.1	—	—	—	—	—
	13:0	—	0.1	—	—	—	—	—
	14:0	0.2	0.6	0.3	0.3	0.2	0.3	0.3
	15:0	27.6	0.2	—	—	0.0	0.0	—
	16:0	4.3	29.1	25.8	25.4	24.0	24.3	23.7
	17:0	—	—	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2
	18:0	46.4	6.0	7.8	11.9	7.7	7.8	10.1
	22:0	—	—	—	—	0.1	—	—
单不饱和脂肪酸/ 总脂肪酸(%)	Total	20.2	58.8	45.5	45.5	49.9	49.9	44.4
	14:1	—	—	—	—	0.0	0.1	—
	16:1	8.4	6.2	4.2	3.0	3.5	3.7	2.8
	17:1	—	—	—	0.1	0.1	0.0	—
	18:1	11.8	52.6	41.3	42.1	46.1	45.9	41.6
	20:1	—	—	—	0.3	0.2	0.2	—
多不饱和脂肪酸/ 总脂肪酸(%)	Total	1.0	5.1	19.3	15.7	16.2	16.5	21.0
	18:2	1.0	4.9	16.0	12.0	12.7	13.2	16.5
	18:3	—	0.2	0.3	—	0.3	0.2	—
	20:2	—	—	—	—	0.1	0.1	—
	20:3	—	—	—	—	0.1	0.2	—
	20:4	—	—	2.6	3.0	2.2	2.2	3.4
	22:6	—	—	0.4	0.7	0.8	0.6	1.1
未知(%)		0.0	0.0	1.1	1.0	1.6	1.0	0.4

a) 数据来源于中国食物成分表(第六版)

籽、鱼油、藻类等)对生产性能、鸡蛋品质、鸡蛋 ω -3 PUFA含量和脂质氧化稳定性的影响尤为重要。

2 维生素类生物营养强化鸡蛋

维生素在人体生长和发育中发挥重要作用,以微量存在于食物中,对生物体新陈代谢至关重要,缺乏会导致疾病发生,如维生素A与视力有关,维生素B₁与脚气病有关,维生素B₃与疥疮有关,维生素B₆与贫血有关,维生素C与坏血病有关,以及维生素D与软骨病有

关等^[24,25]。人体无法自行合成维生素,需要通过饮食摄入。维生素分为两大类,水溶性和脂溶性维生素。水溶性维生素包括B族维生素(B₁, B₂, B₆, B₁₂, 烟酸, 泛酸, 叶酸和生物素)和维生素C,而维生素A, D, E和K属于脂溶性维生素。第三次全国健康和营养调查数据显示,鸡蛋贡献了(按营养素总摄入量的百分比)9%的维生素B₆、17%的叶酸、21%的维生素A、25%的维生素E和25%的维生素B₁₂。鸡蛋中维生素的组成见表3。

鸡蛋中的维生素含量主要由蛋鸡日粮中维生素含量确定。鸡蛋的脂质成分,包括脂溶性维生素,贮存在

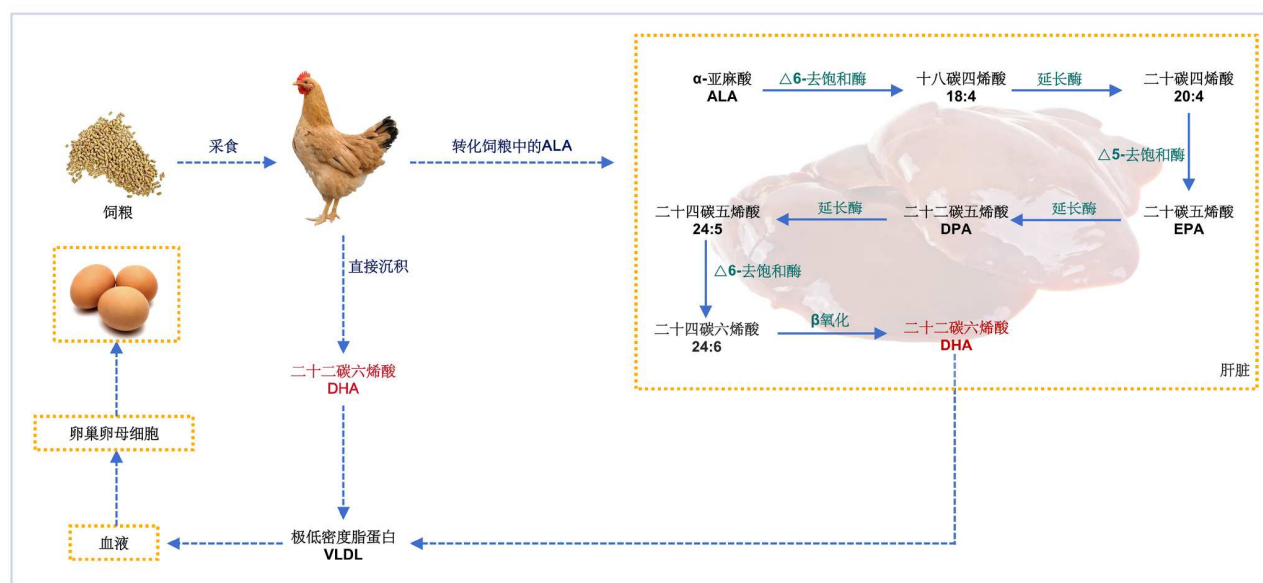


图1 ω -3 PUFAs在蛋鸡体内的代谢及其在鸡蛋中的沉积

Figure 1 Metabolism of ω -3 PUFAs in laying hens and their deposition in eggs

蛋黄里, 脂溶性维生素在蛋鸡产蛋过程中随着日粮来源的脂肪一起被吸收并沉积在蛋黄中。研究表明, 鸡蛋中的维生素可通过改变日粮维生素组成而调控, 维生素可有效沉积在鸡蛋中, 特别是脂溶性维生素^[26-29], 如维生素A, 也包含水溶性维生素, 如叶酸。表4^[11,30-37]总结了蛋鸡日粮中外源添加维生素A及其他脂溶性维生素, 进而生产脂溶性维生素生物营养强化鸡蛋维生素的含量。

目前, 维生素生物营养强化鸡蛋主要以脂溶性维生素为主, 少数水溶性维生素, 不同的养殖方式以及日粮组成, 均可以很大程度改变鸡蛋中的维生素组成, 如是否散养, 日粮中是否添加牧草等。蛋鸡对维生素的吸收效率存在个体差异, 部分维生素在日粮中的生物可利用度较低, 可能导致强化效果不均匀。维生素的稳定性较差, 特别是在高温和氧化环境中, 容易导致其有效成分降解, 从而影响鸡蛋的营养价值。优化维生素的添加技术、提高蛋鸡的吸收效率, 是未来研究的关键方向之一。

2.1 维生素A生物营养强化鸡蛋

维生素A是具有视黄醇生物学特性的化合物统称, 包括视黄醇、视黄酯和视黄醛, 参与多种生理过程, 如视觉、生殖、骨骼发育、免疫反应、细胞分化和增

殖^[38,39]。维生素A的每个国际单位(IU)相当于0.3 μg 的视黄醇活性、0.334 μg 的维生素A醋酸酯活性或0.6 μg 的 β -胡萝卜素活性^[40]。蛋鸡摄入高量的维生素A可以增加蛋中的维生素A含量, 这对提高鸡蛋的质量是有益的, 然而, 维生素A与其他脂溶性维生素之间存在负面相互作用, 并且可能与其他营养素相互作用^[41]。维生素A参与骨发育、免疫反应、细胞分化和增殖等, 维生素A在保持上皮组织, 尤其输卵管上皮组织完整性方面起着重要作用。

沉积中在蛋黄中的维生素A主要来自蛋鸡肝脏的储存, 肝脏在蛋鸡对维生素A新陈代谢和鸡蛋中的沉积起着重要作用^[31,42], 蛋鸡肝脏中和鸡蛋中的维生素A水平, 与蛋鸡饲喂日粮中维生素A的水平和饲喂时间密切相关。Surai和Speake^[42]指出, 给蛋鸡持续饲喂维生素A日粮3个月, 肝脏中的维生素A浓度降低了45%。近年来, Miao等人^[43]采用SFC-DAD-MS/MS方法对鸡蛋蛋黄中类胡萝卜素和维生素A的活性形式进行了准确定量, 该方法的建立对研究维生素A畜禽产品有重要意义; 同时, 其所在团队^[29,44]通过在蛋鸡饲料中添加不同水平的维生素A和 β -胡萝卜素, 明确了维生素A和 β -胡萝卜素在鸡蛋中的沉积规律, 即随饲料维生素A添加水平升高, 鸡蛋中3种维生素A形态含量均显著升高, 其中视黄醇为主要形态, 且对蛋鸡生产性能无显著

表 2 ω -3 PUFAs 生物营养强化鸡蛋饲喂日粮组成及鸡蛋中 ω -3 PUFAs 沉积情况^{a)}Table 2 Chicken diet composition for ω -3 PUFAs-biofortified eggs production and ω -3 PUFAs deposition in eggs^{a)}

参考文献	日粮组成	强化鸡蛋ω-3 PUFA含量		
		ALA	EPA	DHA
Chen等人 ^[9]		mg/100 g蛋黄		
	对照	117	0	202
	2.0%亚麻籽油	1503	25	655
	2.0%美藤果油	1184	18	637
	2.5%美藤果油	1502	28	656
	3.0%美藤果油	1792	21	667
Wang等人 ^[10]		mg/100 g蛋黄, 30天		
	对照	31.13±2.66	0.00±0.00	38.25±11.75
	0.3%微藻油	44.50±8.43	0.75±0.66	184.25±27.76
	0.6%微藻油	58.42±8.14	3.65±0.10	275.13±34.68
	0.9%微藻油	39.31±5.42	5.70±1.07	379.41±14.47
Lawlor等人 ^[11]		mg/蛋黄		
	对照	70	1	62
	20 g/kg微胶囊鱼油	65	12	96
	40 g/kg微胶囊鱼油	73	24	129
	60 g/kg微胶囊鱼油	70	40	162
Kralik等人 ^[12]		占总脂肪酸百分比(%)		
	1.5%亚麻籽油+3.5%鱼油	3.25±0.53	0.25±0.02	2.99±0.36
	2.5%亚麻籽油+2.5%鱼油	4.33±0.53	0.20±0.04	2.35±0.27
	3.5%亚麻籽油+1.5%鱼油	5.18±0.47	0.18±0.01	2.90±0.75
Petrović等人 ^[13]		占总脂肪酸百分比(%)		
	对照	0.50±0.04	0.00±0.00	0.74±0.03
	1%亚麻籽油	1.09±0.18	0.01±0.01	1.25±0.08
	2%亚麻籽油	1.88±0.24	0.01±0.02	1.50±0.15
	3%亚麻籽油	2.21±0.19	0.04±0.02	1.55±0.14
Wen等人 ^[14]		mg/100 g		
	对照	63±3	148±7	3473±47
	1%橡胶籽油	69±5	227±5	3663±52
	2%橡胶籽油	111±9	239±15	4150±134
	4%橡胶籽油	171±13	268±9	4643±23
Kralik等人 ^[15]		mg/100 g鸡蛋		
	对照	99.15±14.80	0.00±0.00	105.43±15.50
	1.5%鱼油+1.5%菜籽油+2%亚麻籽油	265.29±21.90	26.04±2.30	189.32±16.30
Kralik等人 ^[16]		mg/100 g鸡蛋		
	对照	71.73±10.03	5.70±0.44	89.90±4.42
	0.5%鱼油+0.5%裂殖壶菌	177.33±17.65	10.37±1.04	152.25±12.11
Carrillo等人 ^[17]		占总脂肪酸百分比(%)		
	2%沙丁鱼油+10%巨藻	45.17	72.31	434.81
	2%沙丁鱼油+10%浒苔	44.30	61.45	482.22
	2%沙丁鱼油+10%马尾藻	47.09	73.49	437.99

(表2续)

参考文献	日粮组成	强化鸡蛋ω-3 PUFA含量		
		ALA	EPA	DHA
Zhao等人 ^[18]		占总脂肪酸百分比(%)		
	对照	0.46±0.11	ND	0.47±0.05
	10%亚麻籽+1%鱼油	6.36±0.08	0.18±0.02	1.96±0.24
	10%亚麻籽+5%去皮双低菜籽	6.49±0.55	0.08±0.00	1.59±0.13
	5%亚麻籽+10%未去皮双低菜籽	4.82±0.23	0.08±0.01	1.61±0.14
	5%亚麻籽+10%去皮双低菜籽	4.33±0.10	0.06±0.01	1.61±0.08
Feng等人 ^[19]		占总脂肪酸百分比(%)		
	对照	0.42	0.44	0.78
	1%杜仲叶粉	0.46	0.24	0.83
	2%杜仲叶粉	0.53	0.19	0.92
	4%杜仲叶粉	0.54	0.20	1.15
Zhang等人 ^[20]		g/100 g脂肪酸		
	对照	0.522	0.265	0.502
	15%苜蓿草粉	0.675	0.354	1.600
	15%麻叶苜蓿粉	0.746	0.622	2.430
Nain等人 ^[21]		mg/鸡蛋, 18天		
	对照	26.5	3.39	98.8
	7.5%豌豆+亚麻籽	113.1	7.06	135.0
	15%豌豆+亚麻籽	203.9	10.32	118.9
Wu等人 ^[22]		占总脂肪酸百分比(%)		
	对照	0.67±0.04	ND	1.67±0.02
	8%微藻	0.33±0.04	0.52±0.07	4.30±0.17
	8%亚麻籽	4.66±0.20	0.20±0.04	4.02±0.35
Lemahieu等人 ^[23]		占总脂肪酸百分比(%), 3周		
	对照	9.9±1.0	ND	21±3
	0.56%膨化亚麻籽	19.2±2.5	0.05±0.15	33±4
	2.03%球等鞭金藻	12.6±1.2	0.94±0.15	67±3
	0.68%鱼油	11.6±1.2	3.5±0.3	92±3
	0.44% DHA GOLD	12.6±0.9	0.6±0.3	90±5

a) 表中ND表示未检出

表3 一枚普通鸡蛋中维生素含量

Table 3 Vitamin content in a regular egg

维生素	维生素A ^{a)}	维生素D ₃ ^{a)}	维生素E ^{a)}	维生素K ^{a)}	维生素B ₁₂ ^{a)}	核黄素 ^{b)}	泛酸 ^{a)}	叶酸 ^{b)}	胆碱 ^{b)}	生物素 ^{b)}
鸡蛋中含量 (μ g/100 g可食部)	98.3	0.65	2200	216.67	145	365	1271.7	113.3	124400	9.4

a) 数据来源于文献报道; b) 数据来源于中国食物成分表(第六版)

影响并且二者之间存在相互作用.

2.2 叶酸生物营养强化鸡蛋

叶酸是一种人体必需的B族维生素, 包括二氢叶酸、甲基叶酸、多聚谷氨酰叶酸和单聚谷氨酰叶酸

等^[45]. 国家卫生健康委员会发布的中国居民膳食营养素参考摄入量规定, 成人的叶酸推荐摄入量为400 μ g/d (以膳食叶酸当量计), 孕妇的叶酸推荐摄入量为600 μ g/d. 最新中国居民营养与健康状况监测报告显示, 我国居民膳食叶酸平均摄入量为180.9 μ g/d, 叶酸

表 4 维生素A及其他脂溶性维生素生物营养强化鸡蛋生产日粮组成及其鸡蛋中维生素的含量

Table 4 Chicken diet composition for vitamin A and other fat-soluble vitamins biofortified eggs production and their content in eggs

参考文献	日粮组成	鸡蛋中的维生素组成			
		维生素A	维生素D (维生素D ₃)	维生素E	维生素K (维生素K ₃)
Lawlor等人 ^[11]		μg/g蛋黄			
	25.20 mg/kg VE+20.50 mg/kg叶黄素	—	—	8.77	—
	125.20 mg/kg VE+120.50 mg/kg叶黄素	—	—	24.03	—
		IU/kg			
	540 IU/kg VD	—	13	—	—
	5400 IU/kg VD	—	90	—	—
	54000 IU/kg VD	—	850	—	—
		μg			
	30 mg VE	—	—	580	—
	O’Sullivan等人 ^[30]		IU/kg	IU/kg	mg/kg
Local		25375.00	1075.00	80.73	—
OVN [®]		31875.00	1175.00	112.75	—
NRC+Hy.D [®]		20950.00	0.00	33.40	—
NRC		22375.00	0.00	32.75	—
Wang等人 ^[31]		IU/kg			
	4000 IU/kg VA	153	—	—	—
	8000 IU/kg VA	244	—	—	—
	16000 IU/kg VA	250	—	—	—
Naber和Squires ^[32] , Bethke等人 ^[33]		μg			
	12.6 mg VE	—	—	205	—
	22.2 mg VE	—	—	870	—
Nobile等人 ^[34]		μg/100 g DM			
	室内散养	—	3.8	—	—
	室外散养	—	14.3	—	—
	室内/室外兼有	—	11.3	—	—
Kühn等人 ^[35]		IU/100 g蛋黄		IU/100 g	
	紫花苜蓿牧场	2900	—	10.8	—
	三叶草牧场	2900	—	9.6	—
	混合凉季草牧场	2700	—	11.8	—
	普通饲料	187	—	0.21	—
Anderson ^[36]		μg/鸡蛋			
	1500 IU/kg VD ₃	—	1.04	—	—
	3000 IU/kg VD ₃	—	1.97	—	—
	1500 IU/kg VD ₃ +37.5 μg/kg 25-OH-D ₃	—	1.27	—	—
	75 μg/kg 25-OH-D ₃	—	0.71	—	—
O’Sullivan等人 ^[37]		μg/100 g			
	3 mg/kg VK ₃	—	—	—	24.39
	12.9 mg/kg VK ₃	—	—	—	47.46
	23.7 mg/kg VK ₃	—	—	—	51.22
	45.7 mg/kg VK ₃	—	—	—	51.99

摄入量充足人群占比仅为9.0%, 为满足机体健康需要, 仍需额外的叶酸补充。

叶酸参与体内蛋白质和核酸等重要物质的合成。缺乏叶酸会引起贫血和发育迟缓等疾病, 孕妇缺乏叶酸会导致婴儿神经管畸形等^[46,47]。人体不能合成叶酸, 需从食物中摄取, 而天然食物中叶酸以多元谷氨酸形式为主, 稳定性差, 且生物利用率仅50%左右。以蛋鸡为载体, 通过生物富集形式生产叶酸强化鸡蛋, 成为获得天然安全且高生物利用率叶酸的新途径。2021年, Sun等人^[48]采用HPLC-MS/MS联用技术, 采用固相萃取前处理, 发现鸡蛋中的叶酸主要有4种形式, 其中5-甲基四氢叶酸占总叶酸的91%~98%, 而叶酸、5-甲酰四氢叶酸和10-甲酰叶酸合计占2%~9%, 因此, 蛋鸡能有效地将饲料中的叶酸转化为鸡蛋中的5-甲基四氢叶酸, 这种形式的叶酸生物利用率极高。有研究表明, 通过在蛋鸡日粮中添加允许添加的最大剂量叶酸, 生产的叶酸生物营养强化鸡蛋中叶酸的含量可达到普通鸡蛋的2.5倍^[49-51]。据报道, 鸡蛋中的天然叶酸稳定度高, 冷藏(4℃)4周, 或者常温下保存4周, 鸡蛋中的5-甲基四氢叶酸水平与新鲜鸡蛋相当^[49,50]。

3 类胡萝卜素类生物营养强化鸡蛋

类胡萝卜素是一类广泛存在的异戊二烯化合物, 具有色素功能, 可转化为维生素A进而在生物体内维持生理功能, 具有抗氧化、抗炎、光保护等作用, 在预防或治疗各种疾病中也发挥积极作用^[52,53]。鲜鸡蛋中含有不到1%的类胡萝卜素^[54], 同时, 鸡蛋中的类胡萝卜素可调节蛋黄颜色, 使蛋黄呈现淡黄色到不同程度的橙红色。蛋黄中高含量的甘油三酯、磷脂和胆固醇是类胡萝卜素优良的载体^[55], 使得蛋鸡日粮中的类胡萝卜素可通过蛋鸡转化进而沉积在鸡蛋中, 提高鸡蛋的质量和营养价值。由于玉米中叶黄素和玉米黄质含量很高^[56], 因此玉米型蛋鸡日粮中, 叶黄素和玉米黄质是鸡蛋中最常见的类胡萝卜素。在蛋鸡日粮中添加不同的类胡萝卜素, 可有效地将番茄红素、虾青素、 β -胡萝卜素、角黄素、 β -隐黄素、金盏花红素和金盏花黄素等沉积到鸡蛋中。研究表明, 蛋黄中角黄素的沉积率为30%~45%, 玉米黄素为25%, 虾青素为14%, β -隐黄素在鸡蛋中的平均沉积效率(99%)高于叶黄素(43%)和玉米黄素(30%)^[57]。蛋鸡日粮中添加的类

胡萝卜素添加剂种类及其鸡蛋中对应类胡萝卜素含量见表5^[43,58-67]。

鸡蛋(蛋黄)中类胡萝卜素含量随日粮中类胡萝卜素的添加量而改变。不同来源的类胡萝卜素(如番茄红素、 α -胡萝卜素、 β -胡萝卜素、玉米黄质、角黄素等)在不同剂量下对蛋黄中的含量呈现出明显的升高趋势。类胡萝卜素的生物利用度存在差异, 某些来源在消化吸收过程中效率较低, 限制了其在鸡蛋中沉积的能力, 日粮配方的复杂性和不同日粮成分之间的相互作用可能导致强化效果的不一致性。因此, 提高部分类胡萝卜素的生物利用度以及在鸡蛋中的沉积效率是研究的重点方向之一。

3.1 虾青素生物营养强化鸡蛋

虾青素是一种脂溶性类胡萝卜素, 具有很强的抗氧化能力, 其抗氧化能力是 α -生育酚的300倍^[68]。虾青素可以预防动脉粥样硬化, 保护心脏病, 防止神经元因氧化应激而受损, 并减少阿尔茨海默病和癌症的发生^[69], 虾青素可以显著减少对DNA、蛋白质和脂质的氧化损伤, 降低炎症反应并增强人体的免疫力^[70]。Spiller和Dewell^[71]的研究显示, 每天摄入6 mg虾青素(源自血球虫)对成年人是安全的。根据国家卫生健康委卫生健康监督中心发布的《关于批准雨生红球藻等新资源食品的公告》(2010年第17号)规定, 成人的雨生红球藻摄入量应 ≤ 0.8 g/d, 按照雨生红球藻中虾青素含量1.5%~3%计算, 成人每日虾青素摄入量应不高于12~24 mg; 按全反式虾青素含量0.8%~1.5%计算, 成人每日全反式虾青素摄入量应不高于6.4~12 mg。欧洲食品安全局(European Food Safety Authority, EFSA)营养委员会基于一系列的安全性研究和验证后, 在2019年通过的“虾青素作为新型食品添加剂的安全性”规范中指出, 来源于雨生红球藻的虾青素, 其每日允许摄入量(acceptable daily intake, ADI)由2014年的0.034 mg/kg(体重)调整为0.2 mg/kg(体重)。按照成年人体重50~80 kg计算, 虾青素的每日允许摄入量为10~16 mg。该文件还指出, 考虑到沿海地区鱼、虾、甲壳类等富含虾青素食品摄入, 以及营养补充剂等摄入因素, 将成人虾青素的最高摄入量定为8 mg/d。目前, 虾青素产品(保健)建议成人的日常保健用量为4~12 mg/d。目前, 虾青素产品中虾青素形态以虾青素酯为主, 含不同脂类的虾青素利用效率也存在差异, 其中, 来源于雨生

表 5 类胡萝卜素生物营养强化鸡蛋生产及其鸡蛋中类胡萝卜素含量

Table 5 Chicken diet composition for carotenoid-biofortified eggs production and carotenoid content in eggs

参考文献	类胡萝卜素	日粮组成	鸡蛋(蛋黄)中类胡萝卜素含量($\mu\text{g/g}$)
Akdemir等人 ^[58]		对照组	—
		100 mg/kg番茄油树脂	1.58
		200 mg/kg番茄油树脂	1.67
		300 mg/kg番茄油树脂	1.71
Orhan等人 ^[59]	番茄红素	对照组	—
		300 mg/kg番茄粉	6.53
		600 mg/kg番茄粉	8.05
An等人 ^[60]		对照组	—
		10 mg/kg商品番茄红素	0.80
		20 mg/kg商品番茄红素	0.88
Miao等人 ^[43]	α -胡萝卜素	对照组	0.01
An等人 ^[60]		70 g/(只 天)胡萝卜	1.29
Miao等人 ^[43]	β -胡萝卜素	对照组	—
		15 mg/kg商品 β -胡萝卜素	1.04
		30 mg/kg商品 β -胡萝卜素	2.60
		60 mg/kg商品 β -胡萝卜素	5.97
		120 mg/kg商品 β -胡萝卜素	13.48
Jiang等人 ^[61]		对照组	—
		5 mg/kg商品 β -胡萝卜素	1.81
		10 mg/kg商品 β -胡萝卜素	2.68
		20 mg/kg商品 β -胡萝卜素	5.19
Moreno等人 ^[62]		40 mg/kg商品 β -胡萝卜素	4.81
		对照组	0.05
		62%的胡萝卜素强化玉米	0.45
Moreno等人 ^[62]		对照组	0.60
		62%的胡萝卜素强化玉米	29.89
Sünder等人 ^[63]		对照组	5.5
		11.1 g/kg万寿菊花粉和菠菜粉的混合物	14.3
		14.6 g/kg万寿菊花粉和菠菜粉的混合物	14.4
		17.5 g/kg万寿菊花粉和菠菜粉的混合物	14.4
Skřivan等人 ^[64]	玉米黄质	对照组	5.92
		150 mg/kg万寿菊花提取物	10.27
		350 mg/kg万寿菊花提取物	14.93
		550 mg/kg万寿菊花提取物	18.92
		750 mg/kg万寿菊花提取物	20.81
Kim等人 ^[65]		950 mg/kg万寿菊花提取物	25.59
		对照组	9.9
		3.2%的 <i>D. tertiolecta</i> 微藻粉	26.0
Grashorn等人 ^[66]	角黄素	0.5 mg/kg 藻类胡萝卜素	1.58
		1 mg/kg藻类胡萝卜素	2.92
		2 mg/kg藻类胡萝卜素	4.66
		4 mg/kg藻类胡萝卜素	9.92
		8 mg/kg藻类胡萝卜素	20.80
		16 mg/kg藻类胡萝卜素	41.20
		32 mg/kg藻类胡萝卜素	86.70
		64 mg/kg藻类胡萝卜素	154.50
Akiba等人 ^[67]		0.37 mg/kg 焦黄素化学标准品	0.11
		0.75 mg/kg焦黄素化学标准品	0.33
		1.50 mg/kg焦黄素化学标准品	0.52

表 6 虾青素生物营养强化鸡蛋生产日粮组成及鸡蛋中的虾青素含量

Table 6 Chicken diet composition for astaxanthin-biofortified eggs production and astaxanthin content in eggs

参考文献	日粮组成	鸡蛋(蛋黄)中 虾青素含量($\mu\text{g/g}$)
Moller等人 ^[73]	4.42 mg/kg转基因玉米	6.56
Wang等人 ^[74]	42 mg/kg商用虾青添加剂产品	21.77
Dansou 等人 ^[75]	7.1 mg/kg雨生红球藻	2.43
	14.2 mg/kg雨生红球藻	6.65
	21.3 mg/kg雨生红球藻	10.67
	42.6 mg/kg雨生红球藻	22.13
He等人 ^[76]	15 mg/kg雨生红球藻	15.9
	30 mg/kg雨生红球藻	31.9
	45 mg/kg雨生红球藻	38.2
	60 mg/kg雨生红球藻	64.3
Magnuson 等人 ^[77]	10 mg/kg商用虾青添加剂产品	13.2
	20 mg/kg商用虾青添加剂产品	15.8
	40 mg/kg商用虾青添加剂产品	15.7
	80 mg/kg商用虾青添加剂产品	36.2
Gao等人 ^[78]	25 mg/kg商用虾青添加剂产品	12.87
	50 mg/kg商用虾青添加剂产品	21.06
Liu等人 ^[79]	100 mg/kg商用虾青添加剂产品	44.20
	24.32 mg/kg虾青素生物强化玉米	14.15

红球藻中的含中长链脂肪酸的虾青素酯消化率一般在50%左右,生物利用率在42%~48%之间^[72]。表6^[73~79]总结了部分虾青素生物营养强化鸡蛋的生产日粮中添加剂的种类及虾青素在鸡蛋中的沉积量。

3.2 叶黄素生物营养强化鸡蛋

叶黄素是一种脂溶性类胡萝卜素,实验证实叶黄素具有抗氧化、抗肿瘤和增强体内免疫力的作用,同时,叶黄素是人类视网膜中最重要的营养物质,在视网膜的黄斑部记忆晶状体中都含有,在预防眼科疾病中发挥关键作用,尤其预防老年性黄斑病变和老年白内障等,因此又名“眼黄金”^[80,81]。由于人体自身无法合成,需要外源摄入补充。世界卫生组织推荐2 mg/kg体重,日常保健摄入10 mg/d;美国眼科协会推荐每日摄入10 mg叶黄素来预防眼科疾病。鸡蛋是叶黄素的优良载体,叶黄素主要以其游离形态存在于蛋黄中,可通过对蛋鸡饲料中叶黄素的调控,经过蛋鸡生物转化后沉积于鸡蛋中(表7)^[63~65,82~87]。

4 微量元素生物营养强化鸡蛋

微量元素对人体健康至关重要。世界上很大一部分人口缺乏微量营养素,尤其是在发展中国家。据估计,世界上60亿人口中超过60%缺铁(Fe),超过30%缺锌(Zn),15%缺硒(Se),而微量元素可以通过饮食来补充^[88]。在鸡蛋中添加微量元素可以改善特定人群的营养状况,大多数微量元素都沉积在蛋黄中,蛋清中较少。通过在蛋鸡日粮中补充无机或有机形式的微量元素,微量元素可有效沉积在鸡蛋中,形成特定的微量元素生物营养强化鸡蛋。近年来有报道指出,有机形式的微量元素比无机形式的微量元素生物利用度更高且安全阈值更大。目前,广泛研究的微量元素生物营养强化鸡蛋有富硒、富铁或者富锌等。由于我国是一个普遍缺硒的国家,近年来对富硒鸡蛋的关注持续增加。

4.1 富硒鸡蛋

硒(Se)是动物和人类健康的必需微量元素,膳食硒缺乏抑制心肌的发育,导致甲状腺功能减退、免疫系统衰弱,会造成营养不良、血溶性贫血、克山病、大骨节病,以及心血管和糖尿病等各种慢性病^[89,90]。作为营养饲料添加剂的硒被广泛应用于畜牧业,通过增强动物的抗氧化能力来维持健康和提高生产性能。人体对硒元素的摄入主要通过食物,但由于我国硒元素分布不均,绝大多数地区为缺硒或者少硒地区,导致许多缺硒疾病的发生。居民硒摄入水平只有30 $\mu\text{g/d}$,远不及推荐摄入量60 $\mu\text{g/d}$ 。然而,在富硒畜禽产品的生产过程中硒中毒的情况必须被关注,当硒的添加浓度高于动物必需水平时,往往会出现硒中毒的情况。目前,在禽类饲料中常用的硒添加剂包括无机形式(亚硒酸钠和纳米硒等)和有机形式(富硒酵母和硒蛋氨酸等)(表8^[91~98])。

以上众多研究已证实,通过蛋鸡日粮补充硒,可以提高鸡蛋中的硒含量。目前在蛋鸡日粮中的硒源包含有机硒(酵母硒、硒代蛋氨酸、富硒昆虫蛋白等)和亚硒酸钠等无机硒,鸡蛋中硒含量与日粮硒添加水平及添加硒源种类密切相关,饲料有机硒在鸡蛋中的沉积效率高于无机硒。在富硒鸡蛋的生产过程中,蛋鸡的品种、日粮以及饲养方式等都有可能影响鸡蛋中的硒含量,因此准确测定鸡蛋中的硒含量和硒形态至关重要。

表 7 叶黄素生物营养强化鸡蛋生产日粮组成及鸡蛋中的叶黄素含量
Table 7 Chicken diet composition for lutein-biofortified eggs production and lutein content in eggs

参考文献	日粮组成	鸡蛋(蛋黄)中叶黄素含量(μg/g)
Sünder等人 ^[63]	11.1 g/kg万寿菊花粉和菠菜粉的混合物	81.0
	14.6 g/kg万寿菊花粉和菠菜粉的混合物	84.0
	17.5 g/kg万寿菊花粉和菠菜粉的混合物	109.0
Skřivan等人 ^[64]	2.36 mg/kg万寿菊花提取物	18.56
	3.85 mg/kg万寿菊花提取物	29.11
	4.86 mg/kg万寿菊花提取物	30.27
	9.01 mg/kg万寿菊花提取物	30.80
Kim和Shin ^[65]	9.52 mg/kg万寿菊花提取物	36.33
Leeson和Caston ^[82]	4.441 mg/kg微藻粉来源叶黄素	38.9
	518 mg/kg万寿菊	27.5
Hammershøj等人 ^[83]	6.5 mg/kg紫雾荆芥	12.23
Grčević等人 ^[84]	191.33 mg/kg万寿菊提取	107.41
	388.70 mg/kg万寿菊提取	118.86
Habanabashaka等人 ^[85]	0.25 mg/kg番茄粉	13.2
	0.5 mg/kg番茄粉	13.6
	0.75 mg/kg番茄粉	13.9
Englmaierová等人 ^[86]	67.20 mg/kg叶黄素提取物	133.9
	21.4 mg/kg小球藻	49
Skřivan等人 ^[87]	3.9 mg/kg万寿菊花提取物	22.6
	4.7 mg/kg万寿菊花提取物	26.2
	6.2 mg/kg万寿菊花提取物	29.8
	6.90 mg/kg玉米蛋白粉	142.7
	10.27 mg/kg玉米蛋白粉	163.2
	13.61 mg/kg玉米蛋白粉	197.1
	16.95 mg/kg玉米蛋白粉	242.9
	9.87 mg/kg玉米酒糟	119.9
	14.57 mg/kg玉米酒糟	150.7
	19.27 mg/kg玉米酒糟	176.6
	23.95 mg/kg玉米酒糟	211.9

4.2 其他微量元素生物营养强化鸡蛋

富铁鸡蛋. 鸡蛋平均含有1~2 mg铁, 随着产蛋的开始, 蛋鸡本身对铁的每日需求量也会显著增加. 美国国家研究委员会(1994年)建议蛋鸡日粮中铁的添加量为38~50 mg/kg, 我国农业行业标准《鸡饲养标准 NY/T 33-2004》中规定产蛋高峰期蛋鸡日粮中铁的适宜量为60 mg/kg. 铁既有有机形式也有无机形式. 由于膳食中铁的生物利用度较低, 鸡蛋中添加铁元素可以提供缺铁性贫血等特定风险人群膳食营养需要^[99], 增加鸡蛋中的铁含量是一种有效的补铁方式. 富含铁的鸡蛋可能比标准鸡蛋多含10%~20%的铁, 这将为人类提供

10%的每日推荐摄入量.

富锌鸡蛋. 普通鸡蛋的总锌含量通常为10~11 mg/g鸡蛋, 其中99%的锌沉积在蛋黄中. 我国农业行业标准《鸡饲养标准 NY/T 33-2004》中规定产蛋高峰期蛋鸡日粮中锌的适宜量为80 mg/kg, 有报道表明^[100,101], 较高水平的日粮锌(超过2 g/kg的添加量)会造成蛋鸡停产并诱导换羽. 微量元素生物营养强化鸡蛋生产日粮组成及鸡蛋中相对微量元素含量见表9^[102~112].

通过不同形式和剂量的微量元素(如铁、锌、锰、镁和铜)添加到日粮中, 可以显著提高鸡蛋中这些

表 8 富硒鸡蛋生产及其鸡蛋中的硒含量
Table 8 Production of selenium-enriched eggs and selenium content in eggs

参考文献	日粮组成(以硒计)	鸡蛋中硒含量
		mg/kg
Ślupczyńska等人 ^[91]	0.058 mg/kg对照组	0.1562
	0.3 mg/kg亚硒酸钠	0.2559
	0.3 mg/kg富硒酵母	0.2589
	0.3 mg/kg硒代蛋氨酸	0.3820
		mg/kg
Zhao等人 ^[92]	对照组	0.140
	5 mg/kg硒化葡萄糖	0.386
	10 mg/kg硒化葡萄糖	0.470
	0.08 mg/kg对照组	0.1524
	0.3 mg/kg一般组	0.2534
Chantiratikul等人 ^[93]	2.0 mg/kg亚硒酸钠	0.4226
	2.0 mg/kg富硒酵母	1.1605
	2.0 mg/kg富硒昆虫蛋白	0.8320
		mg/kg DM
Dong等人 ^[94]	对照组	0.31
	0.2 mg/kg富硒羽衣甘蓝芽	0.76
	0.4 mg/kg富硒羽衣甘蓝	0.98
	0.2 mg/kg富硒酵母	0.77
	0.4 mg/kg富硒酵母	0.98
		mg/kg
Liu等人 ^[95]	对照组	0.192±0.014
	0.5 mg/kg亚硒酸钠	0.316±0.027
	0.5 mg/kg蛋氨酸硒	0.360±0.027
	0.5 mg/kg纳米硒	0.491±0.018
		mg/kg
Si等人 ^[96]	对照组	0.2683±0.0593
	0.3 mg/kg酵母硒	0.4920±0.0171
	0.5 mg/kg酵母硒	0.6491±0.0142
	0.3 mg/kg亚硒酸钠	0.4780±0.0257
	0.5 mg/kg亚硒酸钠	0.5107±0.0120
		mg/kg全蛋
Wang等人 ^[97]	对照组	18.5
	0.3 mg/kg酵母硒	45.06
	0.6 mg/kg酵母硒	74.96
	0.9 mg/kg酵母硒	93.61
	1.2 mg/kg酵母硒	117.55
	1.5 mg/kg酵母硒	135.53
		μg/kg
Lu等人 ^[98]	对照组	9.34±1.15
	0.24 mg/kg亚硒酸钠	14.31±1.81
	0.46 mg/kg酵母硒	16.76±0.88
	0.34 mg/kg蛋氨酸钠	19.77±0.40
		硒沉积率(%)
Lu等人 ^[98]	对照	74.60
	0.3 mg/kg亚硒酸钠	A组: 47.18

元素的含量. 例如, 铁的添加量与鸡蛋中铁含量呈正相关, 甘氨酸铁螯合物的使用显示出较高的生物利用度. 锌的添加同样表现出随着日粮中锌源的不同而导致鸡蛋中锌含量的变化. 此外, 其他微量元素如锰、镁和铜的强化效果也得到了验证, 显示出饲料中微量元素的形式和对比对鸡蛋营养成分的影响.

5 结论与展望

国民营养事关国民素质提高和经济社会发展. 近年来, 我国居民仍面临营养不足与过剩并存、营养相关疾病多发等问题, 食物营养成为影响国民健康的重要因素. 鸡蛋作为我国居民接受最广泛的食物之一, 也是提供人体所需营养的重要来源之一. 蛋鸡产业是民生产业, 出现了供过于求, 同质化、低效化竞争严重的局面, 急需从“数量型”向“质量效益型”转变. 根据鸡蛋作为营养素最好载体这一特点, 以营养素强化鸡蛋生产为核心, 以蛋鸡产业提质增效为目标, 亟需开发并且不断提升生物营养强化鸡蛋技术体系. 本文综述了脂肪酸、维生素(维生素和叶酸)、微量元素(硒及其他铁锌等)以及类胡萝卜素(叶黄素和虾青素)发挥的生物功能以及已报道的营养强化鸡蛋生产, 包括不同的饲料添加剂、饲养周期以及目标营养素在鸡蛋中的含量.

近几十年来, 我国畜牧科技在饲料资源高效利用与生长效率提升方面取得了巨大的成就. 但是, 在关于特定营养素向畜禽产品中富集沉积方面研究有限, 针对添加剂的形态来源、原料前处理方式等关键节点如何影响产品富集效果, 缺乏应用有效的研究成果; 并且应大力开展新资源的挖掘与开发. 产品检测是实现稳定生产的重要保障. 尽管我国食品营养检测标准体系中涉及一部分鸡蛋中营养素检测方法, 但在快速检测方法领域基本处于空白, 同时针对营养素不同活性形态的定量精准检测方法较少, 营养强化鸡蛋生产质量检测控制技术支撑不足. 长期以来, 标准体系建设滞后是制约我国生物营养强化鸡蛋产业化的瓶颈, 尽管已经制定并颁布了农业行业标准《ω-3多不饱和脂肪酸强化鸡蛋》《ω-3多不饱和脂肪酸强化鸡蛋生产技术规范》《叶酸生物营养强化鸡蛋》和《叶酸生物营养强化鸡蛋生产规程》, 但这并不足以支撑整个营养强化禽蛋产业

表 9 微量元素生物营养强化鸡蛋生产日粮组成及鸡蛋中微量元素含量
Table 9 Chicken diet composition for trace element biofortified eggs production and trace element content in eggs

参考文献	微量元素	日粮组成	鸡蛋中微量元素含量
			mg/kg(数据依次为蛋壳, 蛋黄, 蛋清)
Xie等人 ^[102]		0 mg/kg甘氨酸铁螯合物	1.84, 36.40, 6.31
		20 mg/kg甘氨酸铁螯合物20	2.03, 45.59, 6.72
		40 mg/kg甘氨酸铁螯合物40	2.26, 59.81, 7.03
		60 mg/kg甘氨酸铁螯合物60	2.30, 63.81, 8.16
		80 mg/kg甘氨酸铁螯合物80	2.45, 65.46, 8.30
		120 mg/kg硫酸亚铁	2.56, 73.11, 8.02
		120 mg/kg甘氨酸亚铁	2.75, 83.11, 8.49
Li等人 ^[103]			mg/kg
		250 mg/kg甘氨酸亚铁	51
		500 mg/kg甘氨酸亚铁	52
		750 mg/kg甘氨酸亚铁	59
Du等人 ^[104]	铁		mg/kg蛋黄
		植物源	—
		0 mg/kg Fe	45.52
		49.5 mg/kg Fe	56.52
		60 mg/kg无机铁+氨基酸铁	63.71
		动物源	—
		0 mg/kg Fe	68.52
		49.5 mg/kg Fe	60.61
Jiang等人 ^[105]		60 mg/kg无机铁+氨基酸铁	70.44
			mg/kg
		对照组	41.93
		4 mg/kg血红素铁	81.01
		8 mg/kg血红素铁	72.47
Li等人 ^[103]	锌	12 mg/kg血红素铁	82.16
			mg/kg
		0 mg/kg富锌酵母	10.1
		60 mg/kg富锌酵母	10.4
		120 mg/kg富锌酵母	11.5
		240 mg/kg富锌酵母	11.1
		0 mg/kg羟基蛋氨酸锌	9
		60 mg/kg羟基蛋氨酸锌	11
		120 mg/kg羟基蛋氨酸锌	13
		240 mg/kg羟基蛋氨酸锌	14
		40 mg/kg蛋白质锌A组	20.4
		80 mg/kg蛋白质锌B组	22.0
		120 mg/kg蛋白质锌C组	22.4
		160 mg/kg蛋白质锌D组	23.0
		268 mg/kg杆菌肽锌	10.01±0.24
Kannan等人 ^[106]		200 mg/kg果胶寡糖螯合锌	9.66±0.34
		400 mg/kg果胶寡糖螯合锌	B组: 9.57±0.18
		600 mg/kg果胶寡糖螯合锌	C组: 9.29±0.14
Wang等人 ^[107]			

(表9续)

参考文献	微量元素	日粮组成	鸡蛋中微量元素含量
			锌保留率(%)
Tsai等人 ^[108]		对照组	21.51
		60 mg/kg氧化锌	21.74
		60 mg/kg锌蛋氨酸	45.76
		60 mg/kg纳米锌	45.54
Liu等人 ^[109]			mg/kg
		35 mg/kg硫酸锌	31.06±2.61
		70 mg/kg硫酸锌	35.36±2.25
		35 mg/kg氨基酸络合锌	35.87±1.75
		70 mg/kg氨基酸络合锌	38.82±3.76
Khoshbin等人 ^[110]	锰		mg/kg
		基础饲料+100%硫酸锰	0.736
		75%硫酸锰+25%有机锰螯合物	0.532
		50%硫酸锰+ 50%有机锰螯合物	1.061
		25%硫酸锰+ 75%有机锰螯合物	0.692
Belkameh等人 ^[111]	镁		mg/kg, 蛋壳镁干重
		基础日粮	4390
		2.00 g/kg氧化镁	4570
		4.00 g/kg氧化镁	4880
		6.00 g/kg氧化镁	5050
Kim等人 ^[112]	铜		mg/kg
		100 mg/kg硫酸铜	4.4
		200 mg/kg硫酸铜	4.5
		300 mg/kg硫酸铜	4.9
		100 mg/kg三氯化铜	4.4
		200 mg/kg三氯化铜	4.5
		300 mg/kg三氯化铜	5.2

全面发展, 亟待突破。为此, 需要加强对特定营养素富集技术的研究, 通过蛋鸡日粮精准配制等方式, 提高营养素在鸡蛋中的转化效率, 完善检测方法, 确保生物营养强化鸡蛋的质量; 通过制定和实施更为细化的标准, 推动新资源的开发与应用, 以实现生物营

养强化鸡蛋的产业化和可持续发展, 满足日益增长的市场需求; 打造高技术含量、高附加值的优质生物营养强化禽蛋产品, 促进产业提质增效; 建立我国生物营养强化鸡蛋全产业链标准体系, 引导产业绿色健康发展。

参考文献

1 Mikula K, Izydorczyk G, Skrzypczak D, et al. Controlled release micronutrient fertilizers for precision agriculture—a review. *Sci Total Environ*, 2020, 712: 136365

2 Siddique K H M, Li X, Gruber K. Rediscovering Asia’s forgotten crops to fight chronic and hidden hunger. *Nat Plants*, 2021, 7: 116–122

3 Vance L I. Making connections: agriculture, human nutrition, and the environment. Dissertation for Doctoral Degree. Raleigh: North Carolina State University, 2014

4 Saini R K, Keum Y S. Omega-3 and omega-6 polyunsaturated fatty acids: dietary sources, metabolism, and significance—a review. *Life Sci*,

- 2018, 203: 255–267
- 5 Shahidi F, Ambigaipalan P. Omega-3 polyunsaturated fatty acids and their health benefits. *Annu Rev Food Sci Technol*, 2018, 9: 345–381
- 6 Rubio-Rodríguez N, Beltrán S, Jaime I, et al. Production of omega-3 polyunsaturated fatty acid concentrates: a review. *Innov Food Sci Emerg Technol*, 2010, 11: 1–12
- 7 Cantor A H, Decker E A, Collins V P. Fatty acids in poultry and egg products. In: *Fatty Acids in Foods and Their Health Implications*. Boca Raton: CRC Press, 2007. 141–168
- 8 Scippo M L. Conjugated linolenic acids of plant origin: Bioconversion in laying hens, enrichment of egg yolk and impact of their consumption on human health [D]. UGent
- 9 Chen H, Dansou D M, Yu Y N, et al. Effects of dietary different supplemental levels of sachinchi oil on performance, egg quality, and enrichments of ω -3 polyunsaturated fatty acids and Vitamin E in egg yolk of laying hens (in Chinese). *Chin J Anim Nutr*, 2023, 35: 2990–3000 [陈晗, Dansou Dieudonné Mahukpégo, 余雅男, 等. 饲料中添加不同水平美藤果油对蛋鸡生产性能、蛋品质以及蛋黄中 ω -3多不饱和脂肪酸与维生素E富集的影响. *动物营养学报*, 2023, 35: 2990–3000]
- 10 Wang W W, Zhang Y Q, Zhou Z B, et al. Effect of microalgal oil on the deposition of ω -3 polyunsaturated fatty acids in eggs (in Chinese). *Anim Breed Feed*, 2022, 21: 46–50 [王维维, 张运强, 周昭彬, 等. 微藻油对鸡蛋中 ω -3多不饱和脂肪酸沉积的影响. *养殖与饲料*, 2022, 21: 46–50]
- 11 Lawlor J B, Gaudette N, Dickson T, et al. Fatty acid profile and sensory characteristics of table eggs from laying hens fed diets containing microencapsulated fish oil. *Anim Feed Sci Tech*, 2010, 156: 97–103
- 12 Kralik G, Škrtić Z, Suchý P, et al. Feeding fish oil and linseed oil to laying hens to increase the n-3 PUFA in egg yolk. *Acta Vet Brno*, 2008, 77: 561–568
- 13 Petrović M, Gačić M, Karačić V, et al. Enrichment of eggs in n-3 polyunsaturated fatty acids by feeding hens with different amount of linseed oil in diet. *Food Chem*, 2012, 135: 1563–1568
- 14 Wen Z, Wu Y, Qi Z, et al. Rubber seed oil supplementation enriches n-3 polyunsaturated fatty acids and reduces cholesterol contents of egg yolks in laying hens. *Food Chem*, 2019, 301: 125198
- 15 Kralik Z, Kralik G, Košević M, et al. Natural multi-enriched eggs with n-3 polyunsaturated fatty acids, selenium, vitamin E, and lutein. *Animals*, 2023, 13: 321
- 16 Kralik G, Grčević M, Hanžek D, et al. Feeding to produce n-3 fatty acid-enriched table eggs. *J Poult Sci*, 2020, 57: 138–147
- 17 Carrillo S, Rios V H, Calvo C, et al. n-3 Fatty acid content in eggs laid by hens fed with marine algae and sardine oil and stored at different times and temperatures. *J Appl Phycol*, 2012, 24: 593–599
- 18 Zhao L N. n-3 polyunsaturated fatty acid of different sources enrichment in eggs and its effects on laying performance and egg quality (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2008 [赵丽娜. 不同原料中的n-3多不饱和脂肪酸在鸡蛋中富集规律及对蛋鸡生产性能和鸡蛋品质的影响. 硕士学位论文. 武汉: 华中农业大学, 2008]
- 19 Feng Y, Dai G, Han X, et al. Feeding laying ducks *Eucommia ulmoides* oliv. leaves increases the n-3 fatty acids content and decreases the n-6:n-3 PUFA ratio in egg yolk without affecting laying performance or egg quality. *Foods*, 2023, 12: 287
- 20 Zhang J, Na T, Jin Y, et al. Thicker shell eggs with enriched n-3 polyunsaturated fatty acids and lower yolk cholesterol contents, as affected by dietary nettle (*Urtica cannabina*) supplementation in laying hens. *Animals*, 2020, 10: 1994
- 21 Nain S, Renema R A, Korver D R, et al. Characterization of the n-3 polyunsaturated fatty acid enrichment in laying hens fed an extruded flax enrichment source. *Poult Sci*, 2012, 91: 1720–1732
- 22 Wu Y B, Yang L Y, Yan H J, et al. Comparative study on increasing the content of omega-3 polyunsaturated fatty acids in egg yolk by adding microalgae and flaxseed to feed (in Chinese). *Chin J Anim Nutr*, 2015, 27: 3188–3197 [吴永保, 杨凌云, 闫海洁, 等. 饲料中添加微藻和亚麻籽提高鸡蛋黄中 ω -3多不饱和脂肪酸含量对比研究. *动物营养学报*, 2015, 27: 3188–3197]
- 23 Lemahieu C, Bruneel C, Ryckebosch E, et al. Impact of different omega-3 polyunsaturated fatty acid (n-3 PUFA) sources (flaxseed, Isochrysis galbana, fish oil and DHA Gold) on n-3 LC-PUFA enrichment (efficiency) in the egg yolk. *J Funct Foods*, 2015, 19: 821–827
- 24 Muhammad A M, Muhammad A, Waseem A, et al. Biological importance of vitamins for human health: a review. *J Agric Basic Sci*, 2017, 2: 50–58
- 25 Organization W H. Vitamin and Mineral Requirements in Human Nutrition. Geneva: World Health Organization, 2004
- 26 Cornescu G M, Panaite T D, Untea A E, et al. Liposoluble vitamins importance into laying hens nutrition. *Sci Paper Anim Sci Biotechnol*, 2022, 55: 19–23

- 27 Ward N E. Vitamins in Eggs: Egg Innovations and Strategies for Improvements. San Diego: Academic Press, 2017. 207–220
- 28 Zhou J, Wang M, Pallarés N, et al. Sterols and fat-soluble vitamins. In: Food Lipids. New York: Academic Press, 2022. 323–348
- 29 Miao Q, Tang C, Yang Y, et al. Deposition and bioconversion law of β -carotene in laying hens after long-term supplementation under adequate vitamin A status in the diet. *Poult Sci*, 2023, 102: 103046
- 30 O’Sullivan S, Hull G, Danaher M, et al. Vitamin K-biofortification of eggs: effect on egg quality and hen performance parameters. *Proc Nutr Soc*, 2020, 79: E119
- 31 Wang Y, Wang J, Shi Y, et al. Quantitative proteomic analyses during formation of chicken egg yolk. *Food Chem*, 2022, 374: 131828
- 32 Naber E C, Squires M W. Vitamin profiles of eggs as indicators of nutritional status in the laying hen: diet to egg transfer and commercial flock survey. *Poult Sci*, 1993, 72: 1046–1053
- 33 Bethke R M, Record P R, Wilder O H M, et al. Effect of different sources of vitamin D on the laying bird. *Poult Sci*, 1936, 15: 336–344
- 34 Nobile S, Irving E. Relationship of α -tocopherol in the feed to total tocopherol in the egg. *Vet Record*, 1966, 78, 113–114
- 35 Kühn J, Schutkowski A, Kluge H, et al. Free-range farming: a natural alternative to produce vitamin D-enriched eggs. *Nutrition*, 2014, 30: 481–484
- 36 Anderson K E. Comparison of fatty acid, cholesterol, and vitamin A and E composition in eggs from hens housed in conventional cage and range production facilities. *Poult Sci*, 2011, 90: 1600–1608
- 37 O’Sullivan S M, E. Ball M E, McDonald E, et al. Biofortification of chicken eggs with vitamin K—nutritional and quality improvements. *Foods*, 2020, 9: 1619
- 38 Ross A C, Harrison E H. Vitamin A: nutritional aspects of retinoids and carotenoids. In: Handbook of Vitamins. 4th Edition. Boca Raton: CRC Press, 2012: 1–40
- 39 Oruch R, Pryme I F. The biological significance of vitamin A in humans: a review of nutritional aspects and clinical considerations. *Sci Jet*, 2012, 1: 1–13
- 40 Tokuşoğlu Ö, Parvizi M. Nutraceutical powders as sources of anticarcinogenic vitamins and carotenoids biochemistry and medical genomics approach. In: Food By-Product Based Functional Food Powders. Boca Raton: CRC Press, 2018. 203–248
- 41 Schiavone A, Barroeta A C. Egg enrichment with vitamins and trace minerals. In: Improving the Safety and Quality of Eggs and Egg Products. Cambridge: Woodhead Publishing, 2011. 289–320
- 42 Surai P F, Speake B K. Distribution of carotenoids from the yolk to the tissues of the chick embryo. *J Nutr Biochem*, 1998, 9: 645–651
- 43 Miao Q, Yang Y, Du L, et al. Development and application of a SFC-DAD-MS/MS method to determine carotenoids and vitamin A in egg yolks from laying hens supplemented with β -carotene. *Food Chem*, 2023, 414: 135376
- 44 Du L H, Yang Y Y, Miao Q X, et al. The enrichment of different levels of vitamin A in eggs by adding to feed (in Chinese). *Chin J Anim Nutr*, 2023, 35: 2276–2285 [杜利红, 杨悠悠, 苗启翔, 等. 饲料添加不同水平维生素A向鸡蛋中富集规律的研究. *动物营养学报*, 2023, 35: 2276–2285]
- 45 Sinbad O O, Folorunsho A A, Olabisi O L, et al. Vitamins as antioxidants. *J Food Sci Nutr Res*, 2019, 2: 214–235
- 46 Eichholzer M, Tönz O, Zimmermann R. Folic acid: a public-health challenge. *Lancet*, 2006, 367: 1352–1361
- 47 Field M S, Stover P J. Safety of folic acid. *Ann New York Acad Sci*, 2018, 1414: 59–71
- 48 Sun D, Jin Y, Zhao Q, et al. Modified EMR-lipid method combined with HPLC-MS/MS to determine folates in egg yolks from laying hens supplemented with different amounts of folic acid. *Food Chem*, 2021, 337: 127767
- 49 Altic L, McNulty H, Hoey L, et al. Validation of folate-enriched eggs as a functional food for improving folate intake in consumers. *Nutrients*, 2016, 8: 777
- 50 House J D, Braun K, Ballance D M, et al. The enrichment of eggs with folic acid through supplementation of the laying hen diet. *Poult Sci*, 2002, 81: 1332–1337
- 51 Sahlin A, House J D. Enhancing the vitamin content of meat and eggs: implications for the human diet. *Can J Anim Sci*, 2006, 86: 181–195
- 52 Meléndez-Martínez A J, Mandić A I, Bantis F, et al. A comprehensive review on carotenoids in foods and feeds: *status quo*, applications, patents, and research needs. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2022, 62: 1999–2049
- 53 Bhatt T, Patel K. Carotenoids: potent to prevent diseases review. *Nat Prod Bioprospect*, 2020, 10: 109–117
- 54 Dansou D M, Zhang H, Yu Y, et al. Carotenoid enrichment in eggs: from biochemistry perspective. *Anim Nutr*, 2023, 14: 315–333
- 55 Xiao N, Zhao Y, Yao Y, et al. Biological activities of egg yolk lipids: a review. *J Agric Food Chem*, 2020, 68: 1948–1957

- 56 Sukto S, Lomthaisong K, Sanitchon J, et al. Variability in prolificacy, total carotenoids, lutein, and zeaxanthin of yellow small-ear waxy corn germplasm. [Int J Agronomy](#), 2020, 2020: 1–12
- 57 Burt A J, Caston L, Leeson S, et al. Development and utilization of high carotenoid maize germplasm: proof of concept. [Crop Sci](#), 2013, 53: 554–563
- 58 Akdemir F, Orhan C, Sahin N, et al. Tomato powder in laying hen diets: effects on concentrations of yolk carotenoids and lipid peroxidation. [Br Poult Sci](#), 2012, 53: 675–680
- 59 Orhan C, Kucuk O, Sahin N, et al. Lycopene supplementation does not change productive performance but lowers egg yolk cholesterol and gene expression of some cholesterol-related proteins in laying hens. [Br Poult Sci](#), 2021, 62: 227–234
- 60 An B K, Kim D H, Joo W D, et al. Effects of lycopene and tomato paste on oxidative stability and fatty acid composition of fresh belly meat in finishing pigs. [Italian J Anim Sci](#), 2019, 18: 630–635
- 61 Jiang Y H, McGEACHIN R B, Bailey C A. α -tocopherol, β -carotene, and retinol enrichment of chicken eggs. [Poult Sci](#), 1994, 73: 1137–1143
- 62 Moreno J A, Díaz-Gómez J, Fuentes-Font L, et al. Poultry diets containing (keto)carotenoid-enriched maize improve egg yolk color and maintain quality. [Anim Feed Sci Tech](#), 2020, 260: 114334
- 63 Sünder A, Wilkens M, Böhm V, et al. Egg yolk colour in organic production as affected by feeding—consequences for farmers and consumers. [Food Chem](#), 2022, 382: 131854
- 64 Skřivan M, Marounek M, Englmaierová M, et al. Effect of increasing doses of marigold (*Tagetes erecta*) flower extract on eggs carotenoids content, colour and oxidative stability. [J Anim Feed Sci](#), 2016, 25: 58–64
- 65 Kim M J, Shin W S. Stability of zeaxanthin/lutein in yolk oil obtained from microalgae-supplemented egg under various storage conditions. [LWT](#), 2022, 155: 112899
- 66 Grashorn M, Steinberg W. Deposition rates of canthaxanthin in egg yolks. [Archiv Fur Geflugelkunde \(Eur Poult Sci\)](#), 2002, 66: 258–262
- 67 Akiba Y, Sato K, Takahashi K, et al. Pigmentation of egg yolk with yeast *Phaffia rhodozyma* containing high concentration of astaxanthin in laying hens fed on a low-carotenoid diet. [Jpn Poult Sci](#), 2000, 37: 77–85
- 68 Nishida Y, Nawaz A, Hecht K, et al. Astaxanthin as a novel mitochondrial regulator: a new aspect of carotenoids, beyond antioxidants. [Nutrients](#), 2021, 14: 107
- 69 Ambati R, Phang S M, Ravi S, et al. Astaxanthin: sources, extraction, stability, biological activities and its commercial applications—a review. [Mar Drugs](#), 2014, 12: 128–152
- 70 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. [Res Vet Sci](#), 2021, 138: 69–78
- 71 Spiller G A, Dewell A. Safety of an astaxanthin-rich *Haematococcus pluvialis* algal extract: a randomized clinical trial. [J Med Food](#), 2003, 6: 51–56
- 72 Martínez-Delgado A A, Khandual S, Villanueva-Rodríguez S J. Chemical stability of astaxanthin integrated into a food matrix: effects of food processing and methods for preservation. [Food Chem](#), 2017, 225: 23–30
- 73 Moller A, Biard C, Blount J, et al. Carotenoid-dependent signals: indicators of foraging efficiency, immunocompetence or detoxification ability. [Avian Poult Biol Rev](#), 2000, 11: 137–159
- 74 Wang H, He W, Mahukpégo Dansou D, et al. Astaxanthin improved the storage stability of docosahexaenoic acid-enriched eggs by inhibiting oxidation of non-esterified poly-unsaturated fatty acids. [Food Chem](#), 2022, 381: 132256
- 75 Dansou D M, Wang H, Nugroho R D, et al. Effects of duration and supplementation dose with astaxanthin on egg fortification. [Poult Sci](#), 2021, 100: 101304
- 76 He W, Wang H, Tang C, et al. Dietary supplementation with astaxanthin alleviates ovarian aging in aged laying hens by enhancing antioxidant capacity and increasing reproductive hormones. [Poult Sci](#), 2023, 102: 102258
- 77 Magnuson A D, Sun T, Yin R, et al. Supplemental microalgal astaxanthin produced coordinated changes in intrinsic antioxidant systems of layer hens exposed to heat stress. [Algal Res](#), 2018, 33: 84–90
- 78 Gao S, Li R, 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. [Poult Sci](#), 2020, 99: 5874–5882
- 79 Liu X, Ma X, Wang H, et al. Metabolic engineering of astaxanthin-rich maize and its use in the production of biofortified eggs. [Plant Biotechnol J](#), 2021, 19: 1812–1823

- 80 Mitra S, Rauf A, Tareq A M, et al. Potential health benefits of carotenoid lutein: an updated review. *Food Chem Toxicol*, 2021, 154: 112328
- 81 Ma L, Lin X M. Effects of lutein and zeaxanthin on aspects of eye health. *J Sci Food Agric*, 2010, 90: 2–12
- 82 Leeson S, Caston L. Enrichment of eggs with lutein. *Poult Sci*, 2004, 83: 1709–1712
- 83 Hammershoj M, Kidmose U, Steenfeldt S. Deposition of carotenoids in egg yolk by short-term supplement of coloured carrot (*Daucus carota*) varieties as forage material for egg-laying hens. *J Sci Food Agric*, 2010, 90: 1163–1171
- 84 Grčević M, Kralik Z, Kralik G, et al. Effects of dietary marigold extract on lutein content, yolk color and fatty acid profile of omega-3 eggs. *J Sci Food Agric*, 2019, 99: 2292–2299
- 85 Habanabashaka M, Sengabo M, Oladunjoye I. Effect of tomato waste meal on lay performance, egg quality, lipid profile and carotene content of eggs in laying hens. *Iran J Appl Anim Sci*, 2014, 4: 555–559
- 86 Englmaierová M, Skřivan M, Bubancová I. A comparison of lutein, spray-dried *Chlorella*, and synthetic carotenoids effects on yolk colour, oxidative stability, and reproductive performance of laying hens. *Czech J Anim Sci*, 2013, 58: 412–419
- 87 Skřivan M, Englmaierová M, Skřivanová E, et al. Increase in lutein and zeaxanthin content in the eggs of hens fed marigold flower extract. *Czech J Anim Sci*, 2015, 60: 87–96
- 88 White P J, Broadley M R. Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets—iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine. *New Phytol*, 2009, 182: 49–84
- 89 Foster L H, Sumar S. Selenium in health and disease: a review. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 1997, 37: 211–228
- 90 Rayman M P. Selenium and human health. *Lancet*, 2012, 379: 1256–1268
- 91 Słupczyńska M, Jamroz D, Orda J, et al. Long-term supplementation of laying hen diets with various selenium sources as a method for the fortification of eggs with selenium. *J Chem*, 2018, 2018: 1–7
- 92 Zhao M M, Wen K, Xue Y, et al. Probing the effects of dietary selenised glucose on the selenium concentration, quality, and antioxidant activity of eggs and production performances of laying hens. *Animal*, 2021, 15: 100374
- 93 Chantiratikul A, Thongpitak P, Arunsangseesod O, et al. Effect of supplementation and withdrawal of selenium-enriched kale sprouts on productivity and egg selenium concentration of laying hens. *Anim Biosci*, 2023, 36: 484–491
- 94 Dong Z H, Xi H S, Li H, et al. Effects of different selenium sources on selenium deposition in egg (in Chinese). *China Feed*, 2023, 5: 77–80 [董泽涵, 郝洪生, 李慧, 等. 不同硒源饲料对鸡蛋硒沉积的影响. *中国饲料*, 2023, 5: 77–80]
- 95 Liu H. Effects of different selenium source and level on performance, egg quality, content of selenium and blood biochemical indicators in laying hens (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2017 [刘虎. 不同硒源及水平对蛋鸡生产性能、蛋品质、蛋硒含量及血液生化指标的影响. 硕士学位论文. 郑州: 河南农业大学, 2017]
- 96 Si X Y. Influence of yeast selenium on production performance, egg quality and storage stability for laying hens with puffed flaxseed supplemented diet (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020 [司雪阳. 酵母硒对饲喂膨化亚麻籽型饲料蛋鸡生产性能、蛋品质和储存稳定性的影响. 硕士学位论文. 北京: 中国农业科学院, 2020]
- 97 Wang Z M. Effect of Selenium Source on the Performance, Egg Quality and Blood Biochemical Parameters of Laying Hens [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2013 [王泽明. 不同硒源对蛋鸡生产性能、蛋品质及血液生化指标的影响 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2013]
- 98 Lu J, Qu L, Shen M M, et al. Comparison of dynamic change of egg selenium deposition after feeding sodium selenite or selenium-enriched yeast. *Poult Sci*, 2018, 97: 3102–3108
- 99 Shubham K, Anukiruthika T, Dutta S, et al. Iron deficiency anemia: a comprehensive review on iron absorption, bioavailability and emerging food fortification approaches. *Trends Food Sci Tech*, 2020, 99: 58–75
- 100 Khalaji S, H. Naderi A, N. Mousavi S, et al. Determination of phosphorus requirement for post molted laying hens using nonlinear and multivariate nonlinear mixed effects models. *J Poult Sci*, 2014, 51: 22–28
- 101 Mosoeunyane N V. Effect of alternatives to antibiotic growth promoters on broiler performance. University of KwaZulu-Natal Pietermaritzburg, 2006
- 102 Xie C, Elwan H A M, Elnesr S S, et al. Effect of iron glycine chelate supplementation on egg quality and egg iron enrichment in laying hens. *Poult Sci*, 2019, 98: 7101–7109
- 103 Li Z Q. Dietary addition of organic zinc and organic iron on the quality of gallus domestica eggs and zinc and iron content in eggs (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Tianjin: Tianjin Agricultural University, 2019 [李在强. 日粮添加有机锌、有机铁对芦花鸡蛋品质及蛋中

新、铁含量的影响. 硕士学位论文. 天津: 天津农学院, 2019]

- 104 Du A L. Effects of different iron sources on laying performance and iron contents in egg of broiler breeder (in Chinese). *China Feed*, 2018, 22: 52–56 [杜爱玲. 不同铁源日粮对肉种鸡生产性能和鸡蛋铁含量的影响. *中国饲料*, 2018, 22: 52–56]
- 105 Jiang G Y, Pan Y, Gao D Y, et al. Effect of dietary heme iron on egg iron deposition and egg quality of layers (in Chinese). *China Poultry*, 2011, 33: 19–21 [江国永, 潘勇, 高冬余, 等. 血红素铁对鸡蛋铁沉积及蛋品质的影响. *中国家禽*, 2011, 33: 19–21]
- 106 Kannan A, Prakash B, Paul S S, et al. Effect of dietary supplementation of zinc proteinate on performance, egg quality, blood biochemical parameters, and egg zinc content in White Leghorn layers. *Trop Anim Health Prod*, 2022, 54: 160
- 107 Wang Z C, Gao X H, Yu H M, et al. Effects of Zn-POS on performance, egg quality and zinc, iron content in egg of laying hens (in Chinese). *Feed Ind*, 2017, 38: 18–21 [王中成, 高秀华, 于会民, 等. 果胶寡糖螯合锌对蛋鸡生产性能、蛋品质和蛋中锌铁含量的影响. *饲料工业*, 2017, 38: 18–21]
- 108 Tsai Y H, Mao S Y, Li M Z, et al. Effects of nanosize zinc oxide on zinc retention, eggshell quality, immune response and serum parameters of aged laying hens. *Anim Feed Sci Tech*, 2016, 213: 99–107
- 109 Liu H, Chen S J, Zhou S Y, et al. Effects of different zinc source and levels on production performance, egg quality, blood parameters and egg zinc content of laying hens (in Chinese). *Feed Ind*, 2017, 38: 22–29 [刘虎, 陈思佳, 周水岳, 等. 不同锌源及水平对蛋鸡生产性能、蛋品质、血液生化指标以及蛋锌含量的影响. *饲料工业*, 2017, 38: 22–29]
- 110 Khoshbin M R, Vakili R, Tahmasbi A. Manganese-methionine chelate improves antioxidant activity, immune system and egg manganese enrichment in the aged laying hens. *Vet Med Sci*, 2023, 9: 217–225
- 111 Belkameh M M, Sedghi M, Azarfar A. The effect of different levels of dietary magnesium on eggshell quality and laying hen's performance. *Biol Trace Elem Res*, 2021, 199: 1566–1573
- 112 Kim J W, Kim J H, Shin J E, et al. Relative bioavailability of copper in tribasic copper chloride to copper in copper sulfate for laying hens based on egg yolk and feather copper concentrations. *Poult Sci*, 2016, 95: 1591–1597

Research progress on biofortified chicken eggs

YU YaNan, MA KeHan, YANG Jia, HAN HaoYang, Dieudonné M. Dansou, ZHAO LiYuan, ZHAO QingYu, QIN YuChang, TANG ChaoHua & ZHANG JunMin*

State Key Laboratory of Animal Nutrition and Feeding, Institute of Animal Sciences of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China

* Corresponding author; E-mail: zhangjunmin@caas.cn

Eggs are one of the most nutritionally complete and widely accepted foods globally, serving as effective carriers of essential nutrients. Through modification of laying hens' diets, the nutritional composition of chicken eggs can be optimized, transforming them into biofortified functional foods with significant potential. While the intake of macronutrients among Chinese residents is generally adequate, there are still deficiencies in essential micronutrients in specific regions and populations, particularly among infants, women of childbearing age, and the elderly. Biofortified eggs represent a promising strategy to address these nutritional gaps. This paper reviews the research progress on the production of biofortified eggs enriched with ω -3 polyunsaturated fatty acids (ω -3 PUFAs), vitamins (such as vitamin A and folic acid), trace elements (such as selenium), and carotenoids (such as astaxanthin and lutein). The focus is on the bioactive functions of these nutrients and the methods used to enhance their fortification in eggs, aiming to provide a scientific support for the development and expansion of biofortified egg industry.

biofortified chicken egg, polyunsaturated fatty acid, vitamin, trace element, carotenoid

doi: [10.1360/SSV-2024-0216](https://doi.org/10.1360/SSV-2024-0216)