



畜产品 ω -3多不饱和脂肪酸生物营养强化研究应用进展

周龙珠[†], 李萍漾[†], 赵丽媛, 余雅男, 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

[†] 同等贡献

^{*} 联系人, E-mail: tangchaohua@caas.cn; zhangjunmin@caas.cn

收稿日期: 2024-04-15; 接受日期: 2024-06-17; 网络版发表日期: 2024-10-16

中国农业科学院青年创新项目(批准号: Y2022QC08)、中国农业科学院科技创新工程(批准号: ASTIP-IAS-12)和农产品品质规格营养功能评价项目(批准号: PJ2023-007)资助

摘要 ω -3多不饱和脂肪酸(ω -3 polyunsaturated fatty acids, ω -3 PUFAs)是动物和人体的必需营养素, 具有维持机体平衡, 预防多种慢性和代谢性疾病的功能。然而, 我国居民目前存在 ω -3 PUFAs结构性缺乏的情况。随着人们对健康饮食的关注度不断提高, 增加摄入 ω -3 PUFAs成为一个重要的营养目标。畜产品是人类膳食中重要的组成部分, 许多研究证实, 在饲料中添加富含 ω -3 PUFAs的原料可以显著增加畜产品中 ω -3 PUFAs的含量。因此, 畜产品有望成为 ω -3 PUFAs营养强化的载体, 为增加 ω -3 PUFAs摄入量提供一种有效途径。本文综述了 ω -3 PUFAs的膳食营养参考摄入量及我国居民摄入现状, 不同膳食中 ω -3 PUFAs的含量, 畜禽饲料中 ω -3 PUFAs资源状况以及畜产品 ω -3 PUFAs生物营养强化的研究现状, 为进一步研究和开发畜产品的生物营养强化提供实践指导和科学依据。

关键词 ω -3多不饱和脂肪酸, 畜产品, 生物营养强化

《国民营养计划(2017—2030年)》指出, 近年来, 我国人民生活水平不断提高, 营养供给能力显著增强, 但仍面临居民营养不足、营养相关疾病多发等问题。在人类膳食中, ω -3多不饱和脂肪酸(ω -3 polyunsaturated fatty acids, ω -3 PUFAs)是人体无法自行合成, 只能通过膳食摄入的必需脂肪酸, 包括 α -亚麻酸(α -linolenic acid, ALA; C18:3 n-3)、十八碳四烯酸(stearidonic acid, SDA; C18:4 n-3)、二十碳五烯酸(eicosapentaenoic acid, EPA; C20:5 n-3)、二十二碳五烯酸(docosapentaenoic acid, DPA; C22:5 n-3)和二十二碳六烯酸

(docosahexaenoic acid, DHA; C22:6 n-3), 其中, ALA, EPA, DHA是最为重要的 ω -3 PUFAs^[1]。据2019年Lancet发布的统计数据显示, 中国居民摄入海洋源 ω -3 PUFAs(EPA+DHA)的量未达到适宜摄入量(adequate intake, AI)的20%^[2]。 ω -3 PUFAs摄入缺乏可能与心血管疾病、糖尿病、癌症、肥胖症和神经退行性疾病等许多其他健康问题有关联^[3-5]。我国卫生和计划生育委员会2018年推行实施的《恶性肿瘤患者膳食指导》《老年人膳食指导》《成年人糖尿病患者膳食指导》等卫生标准都明确推荐食用富含 ω -3 PUFAs的食物。Hahn

引用格式: 周龙珠, 李萍漾, 赵丽媛, 等. 畜产品 ω -3多不饱和脂肪酸生物营养强化研究应用进展. 中国科学: 生命科学, 2025, 55: 463–478
Zhou L Z, Li P Y, Zhao L Y, et al. Advances in the application of biofortification research on omega-3 polyunsaturated fatty acids in livestock products (in Chinese). Sci Sin Vitae, 2025, 55: 463–478, doi: 10.1360/SSV-2024-0114

等人^[6]研究25871例受试者,发现补充 ω -3 PUFAs可使自身免疫性疾病发生率降低15%。因此,增加 ω -3 PUFAs的摄入量可能有助于促进人体各器官的正常发育和功能。

《中国居民膳食指南(2022)》提出优化动物性食物消费结构,保证膳食能量来源充足,并建议增加水产品的摄入以补充人类膳食中的 ω -3 PUFAs^[7]。然而,在《中国统计年鉴2023》中发现,我国居民近年来对水产品的摄入量增加缓慢^[8]。肉、蛋、乳等畜产品在膳食结构中所占比重较大,再加上优质食源深海鱼类供给无法满足需求,因此提高畜产品中 ω -3 PUFAs含量是一项值得关注的策略。国内外许多研究表明,通过在饲料中添加富含 ω -3 PUFAs的原料,可以有效提高畜产品中的 ω -3 PUFAs含量^[9,10]。这一举措有助于在不大幅改变整体膳食结构的情况下,为居民提供更多 ω -3 PUFAs摄入的可能,从而促进膳食均衡和健康。本文就 ω -3 PUFAs膳食营养参考摄入量、我国居民实际摄入水平、不同膳食中 ω -3 PUFAs含量、畜禽饲料中 ω -3 PUFAs资源状况以及畜产品 ω -3 PUFAs营养强化的研究现状进行综述,为我国功能畜产品高质量发展提供理论依据。

1 ω -3 PUFAs膳食营养参考摄入量和我国居民摄入现状

1.1 ω -3 PUFAs的参考摄入量

不同地区不同机构对于不同人群的 ω -3 PUFAs参考摄入量如表1^[11~19]和表2^[20]所示,对于18岁以上的成年人,大部分国家的 ω -3 PUFAs宏量营养素可接受范围(acceptable macronutrient distribution range, AMDR)参考值在0.5%E~2%E(占总能量的百分比)。2017年,欧洲食品安全局^[21]和澳大利亚卫生部专家委员会^[22]建议成人膳食脂肪的AMDR为20%E~35%E,其中ALA的AI为0.50%E, EPA+DHA的成人推荐范围在0.25~2.00 g/d。联合国粮食及农业组织专家委员会指出,ALA在0.50%E~0.60%E时,可预防必需脂肪酸缺乏症,推荐 ω -3 PUFAs的AMDR在0.50%E~2.00%E, EPA+DHA的AMDR在0.25~2.00 g/d^[11]。对于特殊群体中的孕妇, EPA+DHA的水平低会增大早产概率^[23],在参考摄入量中,会注明孕妇海洋性 ω -3 PUFAs补充要求。

中国营养学会2013年出版的《中国居民膳食营养素参考摄入量》(2013版)规定,成人 ω -3 PUFAs的参考AMDR为0.50%E~2.00%E, EPA+DHA的AI制定为0.25~2.00 g/d,推荐ALA的AI为0.60%E^[24]。2017年,国家卫生和计划生育委员会发布了中华人民共和国卫生行业标准《中国居民膳食营养素参考摄入量 第1部分:宏量营养素(WS/T 578.1-2017)》,当中制定成人 ω -3 PUFAs中ALA的参考AMDR为0.60%E^[25],这与2013版《中国居民膳食营养素参考摄入量》参考值一致,主要依据有一项纳入25项队列研究的Meta分析发现,海洋性 ω -3 PUFAs摄入量每增加0.08 g/d,心血管疾病死亡风险可降低4%^[26];膳食ALA摄入量每增加1.00 g/d,甘油三酯、总胆固醇和低密度脂蛋白胆固醇可分别降低0.0016, 0.0071, 0.0061 mmol/L,且该作用对亚洲人群及高脂血症患者更为显著^[27]。 ω -3 PUFAs虽有其功效性,但考虑到PUFAs摄入过多易发生脂质过氧化,导致自由基的产生,会对细胞和组织造成损伤,因此,《中国糖尿病医学营养治疗指南(2013)》推荐PUFAs摄入不超过供能比的10%,并建议 ω -6/ ω -3 PUFAs的摄入比例在4:1~10:1之间较为适宜^[28]。经过最新一轮修订,我国《中国居民膳食营养素参考摄入量》(2023版)提高了0~6月龄婴儿ALA的AI值,从前一版的0.87%E增加到0.90%E,同时进一步完善了儿童青少年部分EPA+DHA的AI值^[20]。虽然有研究认为 ω -6/ ω -3 PUFAs比值也会改变机体代谢状况,一定范围内比值越小,一些慢性代谢性疾病的发生风险越小,但两者的关系讨论依然存在争议,另一项Meta分析发现血浆中亚油酸(linoleic acid, LA; C18:2 n-6)含量与心血管疾病发生风险呈负相关^[29]。《中国糖尿病医学营养治疗指南(2022版)》也不再强调 ω -6/ ω -3 PUFAs比值。目前大多数国家也并未对 ω -6/ ω -3 PUFAs比值做出推荐,我国也暂不将其纳入推荐范围。

1.2 我国居民 ω -3 PUFAs摄入现状

我国居民膳食 ω -3 PUFAs实际摄入量是了解人群PUFAs营养情况、制定不同人群营养计划和实施营养素摄入干预的重要前提。中国疾病预防控制中心^[30]为评估中国公民的健康和营养状况而进行了以人口为基础的横断面调查:分析了具有全国代表性的204802名20岁以上的成年人样本,使用了中国全国营养调查(China National Nutrition Surveys, CNNS)的1982年(覆

表 1 ω-3 PUFAs的推荐摄入量
Table 1 Recommended intake of ω-3 PUFAs

年龄	欧洲 ^[12]			组织	EPA+DHA
	ALA	EPA+DHA	ω-3 PUFAs		
	AI	AI/AMDR	AI/AMDR (g/d)		成人推荐摄入量(g/d)
0~6月龄婴儿	0.80 g/kg体重 0.10%E~0.18%E	0.02 g/kg体重 ^{a)}	—	联合国粮农组织 ^[11]	0.25~2.00
7~12月龄婴儿	0.70 g/d 0.50%E	0.10 g/d	0.15~0.20	世界卫生组织 ^[13]	0.25~2.00
1~3岁	0.70 g/d 0.50%E	—	0.15~0.20	国际脂肪酸协会 ^[14]	0.50
4~8岁儿童	0.90 g/d	—	0.50	欧洲食品安全局 ^[12]	0.25
9~13岁儿童	1.00 g/d 女 1.20 g/d 男	—	—	澳大利亚和新西兰国家健康 与医学研究委员会 ^[15]	0.43 女 0.61 男
14~17岁青少年	1.10 g/d 女 1.60 g/d 男	—	0.50	英国营养科学咨询委员会 ^[16]	0.45
18岁	0.70~2.30 g/d 0.40%E~0.80%E	—	0.45	比利时高级卫生委员会 ^[17]	0.68
19岁~	0.80%E	—	0.45	美国农业部 ^[18]	0.25
孕妇和哺乳期女性	0.90%E	0.25~2.00 g/d	0.45	美国营养与饮食协会 ^[19]	0.50

a): 每千克体重推荐摄入DHA的含量

表 2 中国对不同人群ω-3 PUFAs的推荐摄入量
Table 2 China's recommended ω-3 PUFAs intake for different populations

年龄	ALA	EPA+DHA	ω-3 PUFAs
	AI	AI/AMDR (g/d)	AMDR (%E)
0~6月龄婴儿	0.50 g/d 0.90%E	0.01 ^{a)}	—
7~12月龄婴儿	0.52 g/d 0.67%E	0.10 ^{a)}	—
13~24月龄婴儿	0.60%E	0.10 ^{a)}	—
3~4岁儿童	0.60%E	0.20	—
5~11岁儿童	0.60%E	0.20	0.50~2.00
12~17岁青少年	0.60%E	0.25	0.50~2.00
18岁~	0.60%E	0.25~20 (AMDR)	0.50~2.00
30岁~	0.60%E	0.25~20 (AMDR)	0.50~2.00
50岁~	0.60%E	0.25~20 (AMDR)	0.50~2.00
65岁~	0.60%E	0.25~20 (AMDR)	0.50~2.00
75岁~	0.60%E	0.25~20 (AMDR)	0.50~2.00
孕妇	+0	0.25 (0.20 ^{a)})	0.50~2.00
哺乳期女性	+0	0.25 (0.20 ^{a)})	0.50~2.00

a): 每天摄入DHA的含量; “+”: 在相应年龄阶段的成年女性需要量基础上增加的需要量

盖27个省份, 中国营养调查招募238124名参与者)、1992年(覆盖30个省份, 中国营养调查招募100201名参
与者)、2002年(覆盖31个省份, 中国营养调查招募247464名参与者)和2010~2012年(覆盖31个省份, 中国

营养调查招募188622名参与者)数据, 获得了中国营养调查报告. 报告显示, 1982年人均海洋源 ω -3 PUFAs (EPA+DHA)每日摄入量为0.0012 g/d, 至2010~2012年增加到0.0036 g/d, 比30年前提高了200%, 表明我国居民海洋性食物的食用占比上升明显. 2019年, *Lancet*全球疾病负担资源中心(Global Burden of Disease, GBD)更新了2017年全球饮食状况, 数据表明东亚地区海洋源 ω -3 PUFAs不足推荐量(0.25~2.00 g/d)的20%, 极大增加了因饮食结构而造成的死亡率和疾病负担^[2]. 而对于居民膳食 ω -3 PUFAs实际摄入量的测算仍缺乏一套规范体系, 制定一套精准、系统的膳食营养评估体系对于一般人群或是特定人群的营养干预至关重要.

与中国疾病预防控制中心采用的横断面普查收集的数据不同, 我们以第6版《中国食物成分表 标准版》^[31]查询到的食物 ω -3 PUFAs含量与在《中国统计年鉴2023》^[8]查找的食物对应消费量为依据(表3)^[8,31], 测算各类食物对人体 ω -3 PUFAs摄入的贡献. 我们采用的测算方法中, 每个食物大类均用该大类中消费量占前列的食物作为代表计算(如肉类, 我国2022年猪牛羊占肉类消费的89%, 因此, 用猪牛羊肉中瘦肉的 ω -3 PUFAs表示肉类的 ω -3 PUFAs含量. 在猪牛羊肉中, 猪肉87.3%、牛肉8.1%和羊肉4.5%, 计算时, 根据对应比例加权计算). 最后发现, 2022年中国居民每人每天摄入 ω -3 PUFAs 1.54 g(0.69%E), ω -6 PUFAs 17.32 g(7.73%E), ω -6/ ω -3 PUFAs比值11.22, 其中海洋源 ω -3 PUFAs(EPA+DHA)人均每天摄入0.047 g, 与*Lancet*统计结果一致, 不足推荐量的1/5. 从整体而言, ω -3 PUFAs和 ω -6 PUFAs摄入量均在可接受范围内, 但对于 ω -6 PUFAs(AMDR: 2.5%E~9%E)摄取量偏高, 建议减少 ω -6 PUFAs摄入的同时增加 ω -3 PUFAs的摄入量, 以获取更均衡的营养.

表3 2022年中国主要食品人均消费量及 ω -3 PUFAs含量

Table 3 The consumption and ω -3 PUFAs content of major foods in China (2022)

指标	粮食(g/d)			食用油(g/d)		畜类(g/d)			禽类(g/d)		水产品(g/d)		蛋类(g/d)	奶类(g/d)	坚果(g/d)
	豆类 (大豆)	薯类 (马铃薯)	谷类 (稻米、小麦)	植物油	动物油	猪肉	牛肉	羊肉	鸡肉	鸭肉	草鱼	牡蛎	鸡蛋	牛奶	核桃
2022年 消费量 ^[8]	374.79			27.40		94.79			32.05		38.08		36.99	33.97	4.1
ω -3 PUFAs 含量(g/100g) ^[31]	1.22	0	0.01	3.82	0	0.02	0.01	0.09	0.01	0.04	0.20	0.38	0.08	0.01	6.86

2 不同食物 ω -3 PUFAs含量及摄入贡献占比

膳食是人体 ω -3 PUFAs的主要来源, 不同类别食物中 ω -3 PUFAs含量差异巨大, 其中ALA是膳食中最主要的 ω -3 PUFAs, EPA和DHA虽然可经ALA在人体内代谢衍生得到, 但转化效率十分有限, 所以更推荐从膳食中摄入, 其中深海鱼类中EPA和DHA含量丰富.

我国定期对食物中营养成分进行抽样调查监测, 最早在1952年发布了中国第1版《食物成分表》. 中国疾病预防控制中心营养与健康所不断完善食物描述信息和数据来源档案, 并于2018/2019年更新出版了第6版《中国食物成分表 标准版》. 根据第6版成分表和<https://www.myfooddata.com/>中的数据测算2022年中国居民 ω -3 PUFAs及 ω -6 PUFAs摄入量, 发现食用油、肉类、粮食、坚果和蛋奶类都对日常 ω -3 PUFAs摄入有一定贡献(图1). ω -3 PUFAs含量高的常见食物有亚麻籽油(53.5 g/100 g)、鲭鱼(7.9 g/100 g)、核桃(6.9 g/100 g)等, 其他常见食物 ω -3 PUFAs含量见表4^[31], 含有一种或几种 ω -3 PUFAs的油脂主要来自某些植物、动物和海洋生物. 但只有海洋生物在富含 ω -3 PUFAs的同时, 还有较低的 ω -6/ ω -3 PUFAs比值, 是一类更适宜用于补充 ω -3 PUFAs的优质食物, 但我国居民人均每日水产品摄入量不足40 g^[8], 全部份额用于深海脂肪鱼的摄入不切实际, 而每日摄入量占大份额的畜禽产品, 若能强化其 ω -3 PUFAs含量, 平衡 ω -6/ ω -3 PUFAs比例, 对于我国居民每日营养摄入结构的改善和健康的维护有重要意义.

3 我国 ω -3 PUFAs资源状况

在自然界中, ω -3 PUFAs主要来源于植物性、动物性和海洋微生物原料, 形成了一个多元而丰富的脂

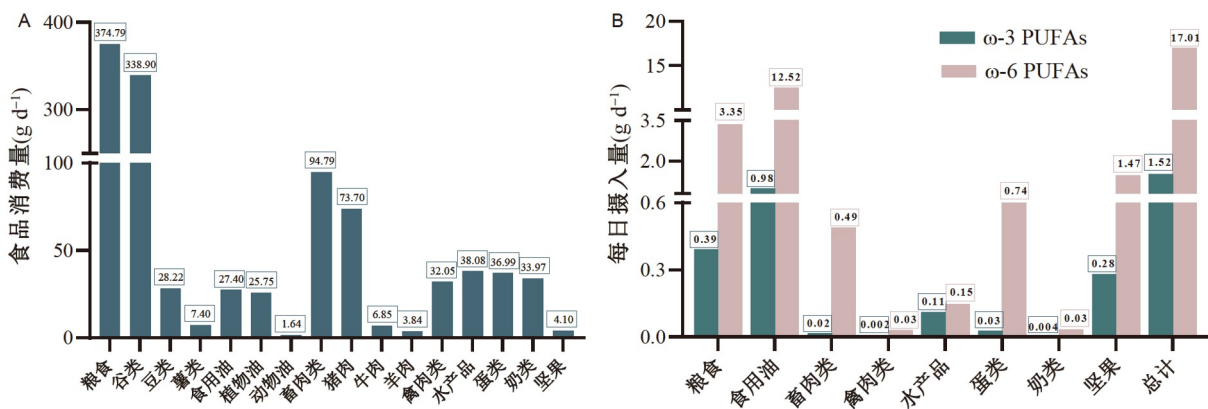


图 1 (网络版彩图)2022年中国居民主要食物人均摄入量及 ω -3 PUFAs和 ω -6 PUFAs来源. 各类别的营养素摄入量为: 该类别中消费量占比大的食物所对应的营养素含量根据消费占比进行加权而得. 粮食用稻米、小麦、大豆和马铃薯表示; 食用油用大豆油和猪油表示; 畜肉类用猪肉、牛肉和羊肉表示; 禽肉类用鸡肉和鸭肉表示; 水产品用草鱼和牡蛎表示; 蛋类用鸡蛋表示; 奶类用牛奶表示; 坚果用核桃表示^[8,31]

Figure 1 (Color online) Main food intake and sources of ω -3 PUFAs and ω -6 PUFAs in Chinese residents in 2022. The nutrient intake for each category is: the nutrient content corresponding to the food with a higher proportion of consumption in that category is weighted based on the proportion of consumption. Grain is represented by rice, wheat, soybeans and potatoes; edible oil is represented by soybean oil and lard; livestock meat is represented by pork, beef, and lamb; poultry meat is represented by chicken and duck meat; aquatic products are represented by grass carp and oysters; eggs are represented by eggs; milk is represented by milk; nuts are represented by walnuts^[8,31]

表 4 我国代表性食物中 ω -3 PUFAs及 ω -6 PUFAs含量^[31]

Table 4 The ω -3 PUFAs and ω -6 PUFAs content of representative foods in China^[31]

种类	总脂肪酸 (g/100 g)	ω -3 PUFAs/总脂肪酸(%)					ω -6 PUFAs/总脂肪酸(%)	ω -6/ ω -3 PUFAs
		18:3	18:4	20:5	22:5	22:6		
猪肉(瘦)	4.1	0.5	—	—	—	—	15.7	31.4
猪肉(肥瘦, fat: 30 g)	26.7	1.7	—	—	—	—	6.0	3.5
牛肉(瘦)	2.9	0.5	—	—	—	—	3.3	6.6
牛肉(肥瘦, fat: 9 g)	8.0	0.5	—	—	—	—	3.0	6.0
羊肉(瘦)	2.9	2.2	—	0.8	—	0.1	9.2	3.0
羊肉(肥瘦, fat: 7 g)	7.4	1.5	—	0.4	—	—	7.6	4.0
鸡肉(瘦)	1.8	0.4	—	—	—	—	5.4	13.5
鸡肉(肥瘦, fat: 9 g)	8.9	2.1	—	—	—	—	21.8	10.4
鸡蛋	10.7	0.3	—	—	—	0.4	18.6	26.7
纯牛奶	3.3	0.4	—	—	—	—	3.1	7.8
鲑鱼	3.7	1.3	—	6.8	2.1	—	4.3	0.2
鲭鱼	27.6	1.9	7.0	7.2	1.1	11.4	3.0	0.1
沙丁鱼	1.0	9.5	—	6.7	1.3	9.9	4.0	0.1
核桃(干)	56.2	12.2	—	—	—	—	64.0	5.2
大豆	14.9	8.2	—	—	—	—	52.9	6.5
大豆油(代表值)	95.6	4.0	—	—	—	—	50.3	12.6
亚麻籽油	95.6	56.0	—	—	—	—	14.8	0.3

肪酸资源网络. 植物性原料是ALA的主要来源, 主要包括亚麻籽、大豆、油菜籽及其所榨出的植物油等. 根据国家统计局的数据, 中国拥有丰富的植物性原料资

源. 2022年, 中国油料作物的年产量达到5682.5万吨, 其中主要包括大豆(2028.3万吨)、花生(1832.9万吨)、油菜籽(1553.1万吨)和芝麻(43.5万吨)^[8]. 根据国家粮

油信息中心(<http://www.grainoil.com.cn/>)、贸易地图(<https://www.trademap.org/>)和《中国食物成分表 标准版》的统计数据, 2022年我国主要植物油脂资源的年产量、进口情况以及 ω -3 PUFAs的含量和总量如表5所示^[8,31]。在大豆油、菜籽油和亚麻籽油中, ω -3 PUFAs的年产量相对较高, 主要成分为ALA。此外, 有研究表明, 一些通过基因工程或其他方式改良修饰的植物, 如转基因大豆, 可以生产出较高含量的EPA和DHA等脂肪酸^[32]。动物性原料主要包括冷水鱼类, 如沙丁鱼、鲱鱼、鲑鱼、鳕鱼和鲱鱼等, 从这些鱼类提取的鱼油 ω -3 PUFAs含量高达25%~59%, 其中沙丁鱼油含41.3%、鲱鱼油含27.9%、鲑鱼油含27.3%, 主要富含EPA和DHA^[33]。根据数据统计, 中国在2022年的鱼油年产量为6万吨^[8]。然而, 作为饲料原料的鱼产品由于本身味道及较高的脂质过氧化反应性, 可能导致畜禽产品中出现异味。海洋微生物中主要是藻类和一些真菌富含EPA和DHA^[33]。Lum等人^[34]综述了海洋微生物, 包括小球藻属(绿藻类)、螺旋藻属(蓝藻类)和紫球藻属(红藻类), 其干重的 ω -3 PUFAs含量达到了24.25%。真菌类中的裂殖壶菌(裂壶藻)含27.20%的DHA和0.28%的EPA^[35]。这些海洋微生物在营养方面具有作为新一代畜禽饲料的潜力, 但相对较高的生产成本和纤维含量可能会限制其作为饲料原料的广泛使用^[36]。随着人们对 ω -3 PUFAs重要性的认识不断提高, 现有的 ω -3 PUFAs来源原料可能不足以满足全球日益增长的需求。因此, 需要进一步开发和研究含有 ω -3 PUFAs的原料, 以寻找更多、更有效的来源。

4 畜产品 ω -3 PUFAs生物营养强化的研究现状

生物营养强化是通过创新育种、栽培、养殖技术, 利用生物体的间接转化增加农产品特定营养成分, 提升其营养价值。 ω -3 PUFAs作为必需脂肪酸, 由于受到插入顺式双键酶的限制, 人体和畜禽无法自行合成, 需要通过膳食摄入。研究发现, 畜产品中脂肪酸的组成与其饲料中脂肪酸的组成高度相关^[37]。因此, 在畜禽饲料中添加富含 ω -3 PUFAs的原料可能是强化畜产品 ω -3 PUFAs谱较为有效的方法。通过合理的饲料配方, 控制畜禽对脂肪酸的摄入量, 提高其产品中 ω -3 PUFAs的含量, 为消费者提供更健康和营养的食品选择。

4.1 畜禽饲料中 ω -3 PUFAs的代谢转化机制

畜禽通过饲料或其他来源摄取的 ω -3 PUFAs多以酯化形式存在, 在体内经过一系列代谢转化过程。代谢转化产物可能会储存在畜禽的肌肉、脂肪、乳腺组织中, 并最终随肉、蛋或奶等形式出现在人类的饮食中。 ω -3 PUFAs主要的代谢转化过程包括: (i) 吸收和运输: 脂肪酸进入消化道, 受到胃液和胃酶的作用进行初步的酶解和乳化(反刍动物中, ω -3 PUFAs会先经历瘤胃中的微生物氢化), 随后被小肠黏膜细胞吸收, 部分与胆固醇等脂质结合, 形成乳糜微粒, 然后通过血液运送到细胞和组织中。(ii) β 氧化: 部分摄入的 ω -3 PUFAs会在细胞内发生 β 氧化反应, 将其代谢为较短链的脂肪酸, 并进一步产生能量供给细胞使用。(iii) 转化

表5 2022年我国主要植物油产量、进口情况及 ω -3 PUFAs的相对含量和总量^[8,31]

Table 5 The main vegetable oil production, import situation, and the content and total amount of ω -3 PUFAs in China in 2022^[8,31]

种类	年产量(万吨) ^{a)}	净进口量(万吨)	ω -3 PUFAs含量(g/100 g)					ω -3 PUFAs总量 (万吨)
			18:3	18:4	20:5	22:5	22:6	
亚麻籽油	23	3	53.5	—	—	—	—	13.9
菜籽油	721	155	6.5	—	0.1	—	—	57.8
大豆油	1770	29	3.8	—	—	—	—	68.7
花生油	310	28	0.1	—	—	1.3	—	4.9
玉米油	51	—	0.6	—	—	—	—	0.3
芝麻油	36	—	0.3	—	—	—	—	0.1
棕榈油	0	619	0.2	—	—	—	—	1.2
油茶籽油	109	—	0.2	—	—	—	—	0.2
葵花籽油	54	60	0.2	—	—	—	—	0.2

a) 年产量: 我国植物油生产量+进口该作物的榨油量

为更长链PUFAs: 从饲料中获得的ALA可以转化为更长链的EPA和DHA(图2)。这种转化主要发生在肝脏或其他组织中, 需要一些特定的酶参与。具体转化途径包括 $\Delta 6$ -去饱和酶使ALA羧基端的第6个C-C键位置添加双键, 产生SDA, 接着经由 $\Delta 6$ 特定伸长酶进一步转化形成二十碳四烯酸(arachidonic acid, AA; C20:4 n-6); 随后, $\Delta 5$ -去饱和酶在第5个C-C键上添加一个双键, 形成EPA, 接着通过Sprecher途径连续进行EPA的双倍延伸, 最终通过 $\Delta 6$ -去饱和酶和裂解反应转化为DHA^[38]。ALA向EPA和DHA的转化取决于饲料和遗传因素, 其中, 饲料中LA和ALA的比例在维持组织中 ω -3和 ω -6长链PUFAs的水平有重要的作用, 因为二者在长链PUFAs的生物合成过程中会竞争相同的伸长酶和去饱和酶, 因此LA和ALA的低比例有利于 ω -3长链PUFAs的生物合成^[39]。Brenna等人^[40]指出, 增加ALA摄入量, 同时减少LA摄入量是改善 ω -3长链PUFAs组成的有效方法。随后, EPA和DHA也可进入血液循环, 并被转运到肌肉、肝脏或者其他脂肪组织中沉积。(iv) 生物活性代谢产物的合成: 在畜禽体内, ω -3 PUFAs可以合成前列腺素、白三烯和神经递质等物质。这些物质具有抗炎、调节血液凝固、调节免疫反应等功能, 对维持生理平衡和健康具有重要作用。

4.2 畜禽肉 ω -3 PUFAs的生物营养强化

畜禽肉中 ω -3 PUFAs的营养强化主要集中在鸡、猪、牛和羊肉中。由于鸡、猪、牛和羊在生理结构和

消化系统上存在差异, 因此对 ω -3 PUFAs的强化效果也会有所不同。鸡和猪的消化系统相对简单, 对 ω -3 PUFAs的吸收效率较高, 强化效果较好; 而牛和羊受到瘤胃微生物氢化的影响, 会降低肉中 ω -3 PUFAs的强化效果。因此, 在制定动物饲料配方时, 应根据动物的营养需求、消化特点和所需产品的目标质量选择合适的饲料添加原料和添加比例, 以实现最佳的营养强化效果。

(1) 鸡肉。常见的禽肉有鸡肉、鸭肉、鹅肉、火鸡肉和鸽肉等。其中, 鸡肉是世界最大的肉类生产和消费产品, 也是我国第二大的肉类消费产品。目前, 国内外已经开展了许多关于添加富含 ω -3 PUFAs的饲料原料来增强鸡肉营养品质的研究, 也发现其效果主要取决于饲料原料的种类^[41]。不同富含ALA, EPA或DHA的饲料原料会影响肉中脂肪酸的组成和含量(表6)^[9,42~57]。例如, Jeon等人^[42]在肉鸡饲料中分别添加了20 g/kg的亚麻籽油、鲑鱼油和裂壶藻, 发现亚麻籽油组中鸡肉ALA的含量升高10倍, ω -6/ ω -3 PUFAs的比例由17.04降低至1.86, 而对EPA和DHA的强化效果不如鲑鱼油组和裂壶藻组。由此可见, 对于EPA和DHA的强化, 添加含该PUFA的饲料原料较依赖ALA在生物体内转化更有效。然而, 高剂量添加鱼油可能导致鸡肉的风味和颜色发生不良变化^[58]。因此, 目前许多研究采用不同组合方式的植物性、动物性或者藻类原料来生产富含高营养价值的鸡肉。研究结果表明, 添加鱼油或微藻和亚麻籽油组合的日粮有助于改善肉鸡的

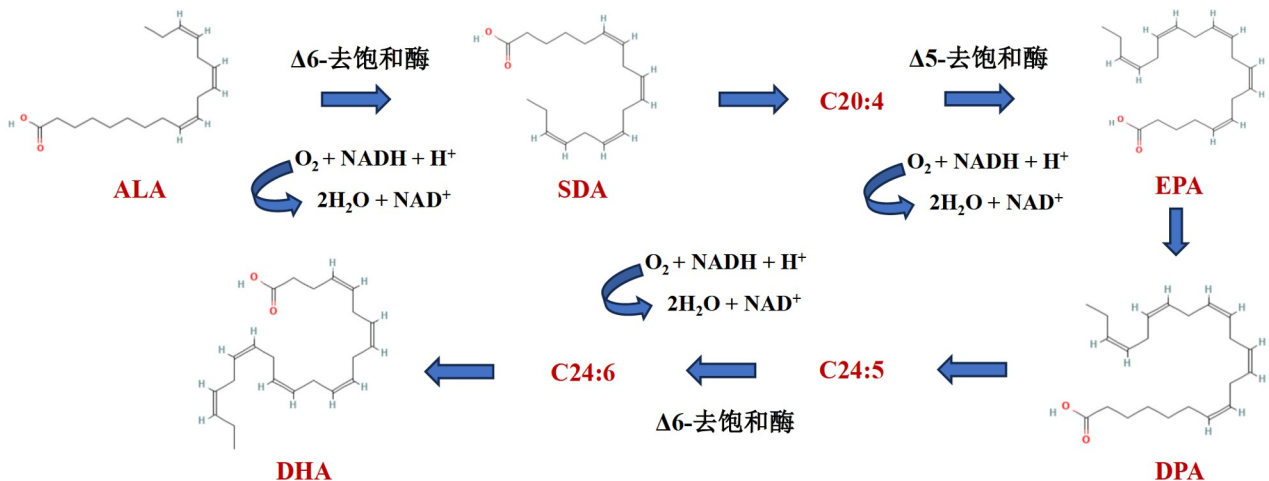


图 2 (网络版彩图)ALA在生物体内合成 ω -3 PUFAs的代谢途径

Figure 2 (Color online) The metabolic pathway of ALA synthesis into ω -3 PUFAs in organisms

表 6 鸡、猪、牛和羊肉中 ω -3 PUFAs生物营养强化的应用

Table 6 Application of biofortification of ω -3 PUFAs in chicken, pork, beef, and lamb meat

试验对象	添加原料和比例	试验周期	试验结果	文献	
鸡	肉鸡(<i>n</i> =480)	20 g/kg 亚麻籽油、鲑鱼油、裂壶藻	5周	肉中 ω -6/ ω -3 PUFAs的比例均有所降低, 亚麻籽油组中鸡肉ALA的含量最高、鲑鱼油组中EPA的含量最高、裂壶藻组中DHA的含量最高	[42]
	肉鸡(<i>n</i> =3840)	2.5% 亚麻籽油	6周	鸡胸肉中 ω -3 PUFAs的含量升高4倍, ALA显著升高, EPA和DHA有升高趋势	[46]
	肉鸡(<i>n</i> =504)	0%, 0.5%, 1%, 2% 裂壶藻	42 d	添加比例越高, 肉中DHA含量越高; 2%添加时, 100 g 鸡胸肉和大腿肉中含97和156 mg DHA	[47]
	肉鸡(<i>n</i> =160)	10 g/kg 亚麻籽+鱼油	2周	肉中ALA的含量增加, ω -6/ ω -3 PUFAs的比值降低	[44]
	肉鸡(<i>n</i> =126)	A: 3%豆油、B: 1%微藻+1%亚麻籽油+1%豆油、C: 2%鱼油+1%豆油	42 d	B和C组血清中葡萄糖, ω -3 PUFAs, EPA, DHA, 谷胱甘肽过氧化物酶, 超氧化物歧化酶和总抗氧化能力升高, 胸肉和腿肉中丙二醛, ω -6 PUFAs和 ω -6/ ω -3 PUFAs的比例降低	[43]
猪	生长育肥猪(<i>n</i> =87)	15% 亚麻籽	屠宰前42 d	肉中SFAs/MUFAs比值降低, PUFAs含量升高, 主要是ALA和 ω -3 PUFAs升高	[48]
	育肥母猪和去势公猪(<i>n</i> =96)	1% 亚麻籽油	54 $\pm$ 3.4 kg 育肥至110.0 $\pm$ 3.0 kg	肉中ALA、EPA、C20:3增加, ω -6/ ω -3 PUFAs和LA/ALA比值均降低	[49]
	生长育肥猪(<i>n</i> =40)	0%, 1%, 2%和3% 金枪鱼油	40 kg 育肥至90 kg	添加比例为3%时, 背脂和肉中EPA和DHA含量较高	[50]
	断奶仔猪(<i>n</i> =31)	前期7%裂壶藻, 后期5%裂壶藻	育肥至第145或146 d 屠宰	肉中 ω -3 PUFAs含量(EPA和DHA)升高, 蛋白质比例和持水能力提升	[51]
	生长育肥猪(<i>n</i> =40)	5% 小球藻	6~7周	肉中 ω -3 PUFAs、EPA和DHA含量升高, ω -6/ ω -3 PUFAs比值降低, 嫩度和整体可接受度提升	[52]
牛	23月龄韩牛(<i>n</i> =21)	0%、10%和15% 亚麻籽	120 d	背膘厚度和大理石花纹评分升高, 肌肉脂肪中 ω -3/ ω -6 PUFAs的比例和ALA含量升高	[53]
	12月龄公牛(<i>n</i> =64)	18.4% 葵花籽或14.3% 亚麻籽	205 d	亚麻籽提高了肌肉中 ω -3 PUFAs和共轭亚油酸的含量, 降低了肉类异味强度; 葵花籽提高了肉中 ω -6 PUFA的含量	[54]
	韩牛(<i>n</i> =20)	2% 裙带菜	—	降低了肉中胆固醇浓度和PUFAs/SFAs的比值, ALA含量增加; 改善了脂肪组织中脂肪酸谱	[55]
羊	5月龄公羊(<i>n</i> =18)	2% 亚麻籽油	80 d	腰大肌中C18:2和总PUFAs的含量及PUFAs/SFAs的比值升高	[9]
	5月龄山羊(<i>n</i> =21)	亚麻籽油和葵花籽油使 ω -6/ ω -3 PUFAs的比例分别为2.27:1、5.01:1和10.38:1	100 d	日粮中 ω -6/ ω -3 PUFAs的比值降低, 背最长肌中顺式-9,反式-11共轭亚油酸、反式疫苗酸、PUFAs的含量以及UFAs/SFAs的比例呈线性增加	[45]
	羔羊(<i>n</i> =40)	1.92% 裂壶藻	6周	肉中 ω -3 PUFAs, EPA和DHA含量升高	[56]
	羔羊(<i>n</i> =24)	3% 裂壶藻	18周	肌肉脂肪中DHA和 ω -3 PUFAs的含量分别增加12.4倍和3.64倍	[57]

生产性能、抗氧化能力以及肉中 ω -3 PUFAs谱^[43]. Konieczka等人^[44]研究发现, 用添加亚麻籽和鱼油的混合饲料喂养的肉鸡所产出的肉制品可以被标记为“富含

ω -3 PUFAs”, 其中100 g的鸡胸肉或大腿肉可分别提供人类每日推荐摄入量的33.0%和15.5%的EPA和DHA.

(2) 猪肉. 近年来, 许多研究对猪进行了生物营养

强化试验, 探索PUFAs对猪肉营养品质的影响. Wang等人^[59]通过检索PubMed和Web of Science数据库(发表于2000年1月1日至2020年10月16日的文章), 分析了包含752头猪的数据, 发现补充PUFAs可以改变脂肪酸组成, 提高猪肉的质量. 表6搜集了一些富含 ω -3 PUFAs的不同种类饲料原料添加到猪饲料中对肌肉组织脂肪酸组成的影响应用, 发现这些原料均可提高猪肌肉组织中 ω -3 PUFAs的含量, 其中亚麻籽是最为常见的饲料添加原料. 添加3%亚麻籽油到猪的日粮中可使腰最长肌中ALA在总脂肪酸中的占比由0.73%升高到2.53%, EPA含量增加6倍, PUFAs和饱和脂肪酸(saturated fatty acids, SFAs)的比值 ≥ 0.4 , ω -6/ ω -3 PUFAs比例由14.87降低至4.64, 接近人类饮食的推荐值^[10]. 根据该试验中腰最长肌营养强化结果, 同时结合2022年猪肉的人均消费量计算发现, 营养强化前后人均摄入猪肉 ω -3 PUFAs含量可由0.0109 g/d升高到0.0356 g/d (图3).

(3) 牛肉. 在牛肉营养强化方面, 尽管瘤胃中微生物氢化 ω -3 PUFAs的效率较高, 但日粮营养调控仍然是常用的方法. 常见用于添加到牛饲料中的 ω -3 PUFAs原料是亚麻籽、亚麻籽油和微藻(表6). 研究发现, 日粮中添加亚麻籽会提高牛肉中ALA, DPA和DHA的含量, 以及特异性氢化产物的积累, 尤其是反式13/14-18:1、反式11、顺式15-18:2等^[60]. 据González等人^[61]的研究结果统计, 在饲草中添加4.5%亚麻籽油后, 牛肉总脂肪酸中 ω -3 PUFAs含量由1.06%升高至2.48%, ω -6/ ω -3 PUFAs比例由5.95降低至2.66, 人均从牛肉中摄入的 ω -3 PUFAs含量增加了1.11倍(图3). 然而, 需要注意的是, 亚麻籽和亚麻籽油中含有一些抗营养成分, 如氰苷、植酸和黏液质, 可能会影响生物体内营养物质的消化和吸收^[62]. 在饲料中添加鱼油或海洋微藻可以抑制瘤胃中微生物将PUFAs氢化至SFAs的最后阶段, 从而增加牛肉中的 ω -3 PUFAs含量^[63]. 但也有研究表明, 在牛日粮中补充PUFAs对牛肉中PUFAs或PUFAs氢化产物含量的影响微乎其微, 并提出在增加牛肉中PUFAs含量的过程中保护其免受瘤胃生物氢化的重要性^[61]. 一些研究试图通过饲料加工或化学处理(如饲喂钙盐或脂肪酸酰胺)来保护PUFAs, 但效果甚微^[64]. 澳大利亚的Scott等人^[65]通过使用甲醛处理的酪蛋白包封油类, 有效实现了PUFAs在瘤胃中的旁路处理, 并最近已将这一技术扩展到长链 ω -3 PUFAs. 因封装油

类的成本很高, 现将该技术应用于油籽, 以降低成本.

(4) 羊肉. 羊肉中 ω -3 PUFAs的营养强化主要通过添加富含ALA的植物源, 如亚麻籽油和葵花籽油, 以及富含DHA的藻类, 如裂壶藻来实现(表6). 相关研究指出, 饲料中添加3%的亚麻籽油可以显著增加羊肉中 ω -3 PUFAs、 ω -6 PUFAs和共轭亚油酸的含量^[66]. Ebrahimi等人^[45]通过亚麻籽油和葵花籽油调节饲料中 ω -6/ ω -3 PUFAs的比例, 发现可调控肌肉组织中 ω -3和 ω -6 PUFAs的水平, 当 ω -6/ ω -3 PUFAs的比值降低至2.27:1时, 可使 ω -3 PUFAs的含量提高2.51倍, 从而有效提升居民对 ω -3 PUFAs的摄入量(图3). 研究还发现, 通过给母羊补充鱼油或富含PUFAs的日粮可增加羔羊肉中ALA, LA, AA, DHA和EPA的含量, 并改善 ω -6/ ω -3 PUFAs的比例^[67]. 此外, 在日粮中加入裂壶藻能够提升羔羊肉中 ω -3 PUFAs的含量, 尤其是EPA和DHA的含量.

4.3 禽蛋 ω -3 PUFAs的生物营养强化

虽然普通禽蛋中 ω -3 PUFAs的含量较少, 但其蛋黄脂肪酸组成极易受饲料脂肪酸组成的影响, 是富集 ω -3 PUFAs的优良食物载体. 在蛋鸡饲料中添加适量亚麻籽、亚麻籽油、鱼油、海洋微藻等均可增加鸡蛋中 ω -3 PUFAs的沉积量, 降低 ω -6/ ω -3 PUFAs的比值, 从而生产出 ω -3 PUFAs强化鸡蛋(表7)^[68-73]. Irawan等人^[74]对34项研究涉及5535只蛋鸡进行Meta分析, 评估日粮中添加含 ω -3 PUFAs的饲料原料对鸡蛋中 ω -3 PUFAs形成和含量的影响, 结果表明, 所有含 ω -3 脂肪酸的饲料原料都与DHA和 ω -3 PUFAs沉积呈正相关, 其中, 亚麻籽油是鸡蛋中产生 ω -3 PUFAs的最有效来源, 在预测鸡蛋中DHA含量提升的模型中, 鱼油被证明是最有效的策略. Neijat等人^[75]研究发现, 添加亚麻籽油到蛋鸡日粮中可使鸡蛋中ALA含量提高近10倍, DHA含量提高近3倍. 在蛋鸡日粮中添加1.5%鱼油可产生142 mg DHA/60 g鸡蛋^[76], 高于添加1.19% 亚麻籽油(DHA: 估计65~80 mg/60 g鸡蛋)^[75]和1%~3%微藻(DHA: 22.1~59.2 mg/60 g鸡蛋)^[71], 相比之下, EPA含量的增加幅度均较小. 为生产含各 ω -3 PUFAs均衡的鸡蛋, Yalçın和Ünal^[77]将10%亚麻籽和1.5%鱼油组合添加到蛋鸡日粮中, 在蛋黄脂质中发现了4.10%的ALA, 0.55%的EPA和3.91%的DHA, ω -6/ ω -3 PUFAs的比例降为2.28. 据报道, 添加高比例鱼油、亚麻籽

油、微藻等饲料原料会降低日粮的氧化稳定性, 并增加鸡蛋中的脂质过氧化水平^[76]。因此, 将具有抗氧化作用的化合物(如植物多酚提取物、维生素E、硒等)与富含 ω -3 PUFAs的饲料原料结合添加^[78,79]或者选用具有较强氧化稳定性的饲料原料添加已被提出为抑制氧化的有效策略。例如, 陈晗等人^[80]选用维生素E含量高且氧化稳定性强的美藤果油添加到蛋鸡日粮中, 结果发现蛋黄中ALA含量增加了10~15倍, DHA+EPA的含量增加了3倍以上, 在提高鸡蛋中 ω -3 PUFAs含量的同时, 改善氧化稳定性。

4.4 牛乳 ω -3 PUFAs的生物营养强化

目前, 关于乳制品中 ω -3 PUFAs的生物营养强化主要集中在通过改变奶牛饲料中 ω -3 PUFAs的组成和

含量来调节牛乳中的 ω -3 PUFAs, 从而生产出富含 ω -3 PUFAs的功能性乳制品。通过查阅发现, 添加含 ω -3 PUFAs的饲料原料(主要为亚麻籽、亚麻籽油、鱼油、微藻等)均有可能增加牛乳中 ω -3 PUFAs的含量(表8)^[81~84]。Gebreyowhans等人^[85]统计了多篇关于强化乳制品中 ω -3脂肪酸的研究, 总结出在奶牛饲料中添加鱼粉或鱼油和微藻可增加牛乳中长链 ω -3脂肪酸(碳数 ≥ 20)的含量, 尤其是DHA(增加约1.08 g/100 g脂肪酸)和EPA(增加约0.21 g/100 g脂肪酸), 而添加亚麻籽、亚麻籽油等可有效提高牛乳中ALA的含量(增加约0.90 g/100 g脂肪酸)。当饲料原料以瘤胃保护和油的形式添加时, 强化 ω -3 PUFAs的效果更好^[85,86]。同时, 在营养强化过程中需考虑采取抗氧化预防措施, 以防止牛乳在贮存过程中产生氧化异味。这些研究旨在生产

表 7 禽蛋中 ω -3 PUFAs生物营养强化的应用
Table 7 Application of biofortification of ω -3 PUFAs in poultry eggs

试验对象	添加原料和比例	试验周期	试验结果	文献
22~23周龄蛋鸡($n=140$)	1%~4%亚麻籽油	16周	添加量为4%时, ALA含量增加5.44倍, ω -6/ ω -3 PUFAs的比例由8.46降低至1.79	[68]
27周龄蛋鸡($n=150$)	13.5%亚麻籽和葵花籽	8周	亚麻籽组鸡蛋中 ω -3 PUFAs的含量升高, ω -6/ ω -3 PUFAs的比例降低; 葵花籽组 ω -6 PUFAs的含量升高	[69]
50周龄蛋鸡($n=120$)	亚麻籽油和大豆油使 ω -6/ ω -3 PUFAs的比例分别为16.7:1, 9.3:1和5.5:1	8周	5.5:1组蛋黄中ALA, EPA, DHA的含量最高, ω -3 PUFAs含量增加5.41倍, ω -6/ ω -3 PUFAs的比例由13.50降低至2.25	[70]
25周龄蛋鸡($n=240$)	3%微拟球藻	28 d	蛋黄中 ω -3 PUFAs含量提高1.47倍	[71]
36周龄蛋鸡($n=96$)	0, 20, 40, 60 g/kg微胶囊鱼油	21 d	随添加量升高, 蛋黄中EPA, DPA, DHA含量显著升高, 60 g/kg组 ω -3 PUFAs含量提高1.47倍	[72]
蛋鸡($n=480$)	3.5%亚麻籽油+1.5%鱼油	30 d	鸡蛋中ALA, EPA, DHA含量显著升高, 每100 g鸡蛋中 ω -3 PUFAs含量达到599 mg, ω -6/ ω -3 PUFAs的比例由10.36降低至1.88	[73]

表 8 牛乳中 ω -3 PUFAs生物营养强化的应用
Table 8 Application of biofortification of ω -3 PUFAs in cow's milk

试验对象	添加原料和比例	试验周期	试验结果	文献
荷斯坦奶牛($n=9$)	3%亚麻籽	15 d	牛乳中 ω -3 PUFAs含量提高了133.06%	[81]
荷斯坦奶牛($n=18$)	2.5%亚麻籽油	94 d	牛乳中ALA含量增加2倍, ω -3 PUFAs含量增加2.18倍, ω -6/ ω -3 PUFAs的比例由7.92降低至2.72	[82]
荷斯坦奶牛($n=24$)	3%亚麻籽油和鱼油(1:1, w/w)	6周	牛乳中ALA, DHA和 ω -3 PUFAs含量显著增加, ω -6/ ω -3 PUFAs的比例由11.63降低至2.28	[83]
泌乳期奶牛($n=32$)	藻粉使每天添加0, 25, 50或75 g DHA/头奶牛	80 d	添加量最高时, 牛乳中DHA含量增加23倍, DPA含量增加7倍, EPA增加1倍, 藻粉的添加量与 ω -3 PUFAs含量呈线性正相关	[84]

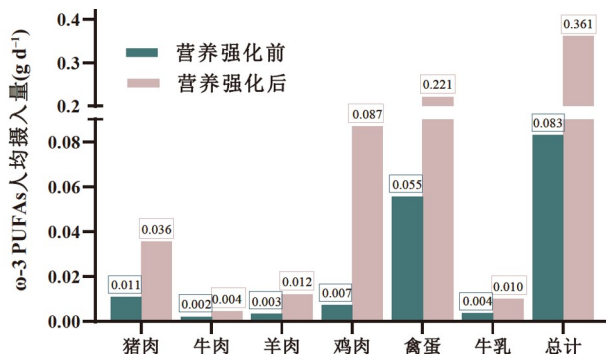


图 3 (网络版彩图)营养强化前后畜产品 ω -3 PUFAs人均摄入量。 ω -3 PUFAs人均摄入量通过畜产品消费量(图1)及相关文献^[10,42,45,61,73,82]中营养强化前后畜产品 ω -3 PUFAs含量计算所得

Figure 3 (Color online) The per capita intake of ω -3 PUFAs in livestock products before and after nutritional fortification. The per capita intake of ω -3 PUFAs is calculated based on the consumption of livestock products (Figure 1) and the levels of ω -3 PUFAs in livestock products before and after nutritional fortification as reported in relevant literature^[10,42,45,61,73,82]

更加营养丰富、更有益健康的牛乳,一定程度上增加消费者对 ω -3 PUFAs的摄入(图3)。虽然相关研究尚处于探索阶段,但已经取得了一些积极的成果,展示了牛乳 ω -3 PUFAs生物营养强化的潜力。

5 畜产品 ω -3 PUFAs生物营养强化的标准现状

为了确保畜禽产品生物营养强化的质量、安全和可追溯性,各国家和地区制定了相关的标准体系。例如,美国农业部食品安全检验局(Food Safety and Inspection Service, FSIS)于2016年发布了肉类、家禽和蛋类产品 ω 脂肪酸声明标签指南,要求企业使用标签前需获得FSIS的批准,并标注营养成分表和 ω 脂肪酸的类型与含量^[87]。欧盟委员会在食品营养和健康声明中规定标有“ ω -3来源”的食品每100 g必须至少含有40 mg EPA+DHA,被认为是“富含 ω -3”的食品每100 g必须至少含有80 mg EPA+DHA^[88]。我国于2022年发布了《食用农产品生物营养强化通则》,规定了食用农产品生物营养强化的目的、方式、基本要求、包装和标识等,要求强化后的营养成分含量或生物可利用性至少比未进行强化的同类产品高出25%^[89]。针对肉类,我国目前编制了《 ω -3多不饱和脂肪酸强化猪肉》行业标准,明确了

添加 ω -3 PUFAs的类别、技术要求、试验方法、检验规则、标识、包装、储存、运输和追溯等方面的规定,要求猪肉中 ω -3多不饱和脂肪酸的含量需 $\geq 2\%$,符合标准的产品可标识“ ω -3多不饱和脂肪酸强化猪肉”。对于禽蛋,农业农村部发布了《 ω -3多不饱和脂肪酸强化鸡蛋》^[90]和《 ω -3多不饱和脂肪酸强化鸡蛋生产技术规范》^[91]两项行业标准,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。

生物营养强化畜产品标准的制定有助于规范生产过程、监督和管理产品的生产环节,促进畜禽养殖业的可持续发展,提升整体水平。这一举措也有助于消费者更好地了解产品营养价值,避免被误导或受到营养信息混淆。同时,推动科研机构和企业进一步开展与畜禽肉营养强化相关的研究与实践,促进技术创新和进步。随着人们健康意识的增强,预计会有更多资源和技术投入到畜禽肉 ω -3 PUFAs生物营养强化研究中。因此,相应的行业标准也需要相继制定以确保产品质量和安全,并促进整个行业的可持续发展。

6 展望

针对畜产品中 ω -3 PUFAs的生物营养强化研究,目前已经取得了一定的进展。未来的展望包括以下4个方面。(i) 饲料配方的优化:目前提高畜产品中 ω -3 PUFAs的含量主要通过添加富含 ω -3 PUFAs的成分实现。未来可以进一步优化饲料配方,寻找更加适合做畜禽饲料的植物性、动物性或藻类等原料,并研发新的添加剂,以提高 ω -3 PUFAs的含量。(ii) 生产和质量控制技术的改进:确保畜产品中 ω -3 PUFAs的稳定性和质量对于实现生物营养强化至关重要。未来应加强对畜禽饲养技术、屠宰和加工过程中的控制,以确保畜产品在贮存期间的稳定性,提高产品的品质。(iii) 健康效益的研究:除了提高 ω -3 PUFAs的含量,还需深入研究其对人体健康的具体效益。进一步探究其对心血管系统、免疫系统和神经系统等方面的影响,为畜产品作为 ω -3 PUFAs的重要来源提供更具说服力的健康效益证据。(iv) 市场推广和消费者教育:提高消费者对于畜产品中 ω -3 PUFAs的认识和了解,促进其健康食品选择的意识,对于推动生物营养强化的应用具有重要意义。此外,还可以通过宣传、标签

和信息披露等手段, 鼓励食品生产商生产和销售富含 ω -3 PUFAs的畜产品, 以满足消费者对高质量健康产品的需求, 推动畜禽产业的发展, 最终提升整体人体健康水平。

参考文献

- 1 Shahidi F, Ambigaipalan P. Omega-3 polyunsaturated fatty acids and their health benefits. *Annu Rev Food Sci Technol*, 2018, 9: 345–381
- 2 Afshin A, Sur P J, Fay K A, et al. Health effects of dietary risks in 195 countries, 1990–2017: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017. *Lancet*, 2019, 393: 1958–1972
- 3 Ahmmed M K, Ahmmed F, Tian H S, et al. Marine omega-3 (n-3) phospholipids: A comprehensive review of their properties, sources, bioavailability, and relation to brain health. *Comp Rev Food Sci Food Safe*, 2020, 19: 64–123
- 4 Dyall S C. Long-chain omega-3 fatty acids and the brain: a review of the independent and shared effects of EPA, DPA and DHA. *Front Aging Neurosci*, 2015, 7: 52–68
- 5 Dennis E A, Norris P C. Eicosanoid storm in infection and inflammation. *Nat Rev Immunol*, 2015, 15: 511–523
- 6 Hahn J, Cook N R, Alexander E K, et al. Vitamin D and marine omega 3 fatty acid supplementation and incident autoimmune disease: VITAL randomized controlled trial. *BMJ*, 2022, 376: e066452
- 7 Chinese Nutrition Society. Dietary Guidelines for Chinese Residents (2022) (in Chinese). Beijing: People's Medical Publishing House, 2022 [中国营养学会. 中国居民膳食指南(2022). 北京: 人民卫生出版社, 2022]
- 8 National Bureau of Statistics. China Statistical Yearbook (2023) (in Chinese). Beijing: China Statistical Press, 2023 [国家统计局. 中国统计年鉴(2023年). 北京: 中国统计出版社, 2023]
- 9 Gao C, Gao D, Zhang Q, et al. Performance, meat quality, intramuscular fatty acid profile, rumen characteristics and serum parameters of lambs fed microencapsulated or conventional linseed oil. *Czech J Anim Sci*, 2022, 67: 365–373
- 10 Bernardi D M, Bertol T M, Coldebella A, et al. Effects of dietary flaxseed oil with or without products with antioxidant properties on pig performance, carcass characteristics, meat quality and oxidative stability. *Anim Prod Sci*, 2022, 62: 1789–1804
- 11 FAO. Fats and fatty acids in human nutrition. Report of an expert consultation. FAO Food Nutr Pap, 2010, 91: 1–166
- 12 European Food Safety Authority Panel on Dietetic Products, Nutrition, and Allergies. Scientific opinion on dietary reference values for fats, including saturated fatty acids, polyunsaturated fatty acids, monounsaturated fatty acids, *trans* fatty acids, and cholesterol. *EFSA J*, 2010, 8: 1461–1567
- 13 Food and Agriculture Organization, World Health Organization. Fats and fatty acids in human nutrition: proceedings of the joint FAO/WHO expert consultation. November 10–14, 2008. Geneva, Switzerland. *Ann Nutr Metab*, 2009, 55: 5–300
- 14 Cunnane S, Dreven C, Harris W. Recommendations for intakes of polyunsaturated fatty acids in healthy adults. *ISSFAL Newsl*, 2004, 11: 12–25
- 15 Australia and New Zealand National Health and Medical Research Council. Nutrient reference values for Australia and New Zealand including recommended dietary intakes. Reference no: N35, N36, N37, 2006
- 16 UK Scientific Advisory Committee on Nutrition. Advice on fish consumption: benefits and risks. 2004
- 17 Superior Health Council of Belgium. Advisory Report: recommendations and claims made on omega-3 fatty acids. 2004
- 18 Flock M R, Harris W S, Kris-Etherton P M. Long-chain omega-3 fatty acids: time to establish a dietary reference intake. *Nutr Rev*, 2013, 71: 692–707
- 19 Kris-Etherton P M, Innis S, American Dietetic Association, Dietitians of Canada. Position of the American dietetic association and dietitians of Canada: dietary fatty acids. *J Am Diet Assoc*, 2007, 107: 1599–1611
- 20 Chinese Nutrition Society. Chinese Dietary Reference intakes (2023 Edition) (in Chinese). Beijing: Science Press, 2023 [中国营养学会. 中国居民膳食营养素参考摄入量(2023版). 北京: 科学出版社, 2023]
- 21 European Food Safety Authority. Dietary reference values for nutrients summary report. *EFSA Support Pub*, 2017, 14: e15121E
- 22 Capra S. New nutrient reference values for Australia and New Zealand: implementation issues for nutrition professionals. *Nutr Dietetics*, 2006, 63: 64–65
- 23 Hoge A, Donneau A F, Dardenne N, et al. Impact of erythrocyte long-chain omega-3 polyunsaturated fatty acid levels in early pregnancy on birth outcomes: findings from a Belgian cohort study. *J Perinatol*, 2020, 40: 488–496

- 24 Chinese Nutrition Society. Chinese Dietary Reference Intakes (2013 Edition) (in Chinese). Beijing: Science Press, 2013 [中国营养学会. 中国居民膳食营养素参考摄入量(2013版). 北京: 科学出版社, 2013]
- 25 National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. WS/T 578.1-2017. Chinese dietary reference intakes—Part 1: Macronutrient (in Chinese). 2017 [中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. WS/T 578.1-2017. 中国居民膳食营养素参考摄入量第1部分: 宏量营养素. 2017]
- 26 Jiang L, Wang J, Xiong K, et al. Intake of fish and marine n-3 polyunsaturated fatty acids and risk of cardiovascular disease mortality: a meta-analysis of prospective cohort studies. *Nutrients*, 2021, 13: 2342–2357
- 27 Yue H, Qiu B, Jia M, et al. Effects of α -linolenic acid intake on blood lipid profiles: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2021, 61: 2894–2910
- 28 Chinese Diabetes Society, Professional Committee of Nutritional Physicians of Chinese Medical Doctor Association. Chinese diabetes medical nutrition therapy guidelines (2013) (in Chinese). *China Diabetes Mell*, 2015, 7: 73–88 [中华医学会糖尿病学分会, 中国医师协会营养医师专业委员会. 中国糖尿病医学营养治疗指南(2013). 中华糖尿病杂志, 2015, 7: 73–88]
- 29 Marklund M, Wu J H Y, Imamura F, et al. Biomarkers of dietary omega-6 fatty acids and incident cardiovascular disease and mortality. *Circulation*, 2019, 139: 2422–2436
- 30 He Y, Li Y, Yang X, et al. The dietary transition and its association with cardiometabolic mortality among Chinese adults, 1982–2012: a cross-sectional population-based study. *Lancet Diabetes Endocrinol*, 2019, 7: 540–548
- 31 Yang Y X. China Food Composition Tables Standard Edition (in Chinese). Beijing: Peking University Medical Press, 2017 [杨月欣. 中国食物成分表 标准版. 北京: 北京大学医学出版社, 2017]
- 32 Hixson S M, Shukla K, Campbell L G, et al. Long-chain omega-3 polyunsaturated fatty acids have developmental effects on the crop pest, the cabbage white butterfly *pieris rapae*. *PLoS ONE*, 2016, 11: e0152264
- 33 Hu J J, Cao X, Wu Z F. Research progress of ω -3 polyunsaturated fatty acids in swine production (in Chinese). *Cereal Feed Ind*, 2017, 48–52+56 [胡金杰, 曹霞, 吴志锋. ω -3多不饱和脂肪酸在养猪生产中的研究进展. 粮食与饲料工业, 2017, 48–52+56]
- 34 Lum K K, Kim J, Lei X G. Dual potential of microalgae as a sustainable biofuel feedstock and animal feed. *J Anim Sci Biotechnol*, 2013, 4: 53–59
- 35 Valença R L, Silva Sobrinho A G, Borghi T H, et al. Performance, carcass traits, physicochemical properties and fatty acids composition of lamb's meat fed diets with marine microalgae meal (*Schizochytrium* sp.). *Livestock Sci*, 2021, 243: 104387–104395
- 36 Fraeye I, Bruneel C, Lemahieu C, et al. Dietary enrichment of eggs with omega-3 fatty acids: a review. *Food Res Int*, 2012, 48: 961–969
- 37 Raes K, De Smet S, Demeyer D. Effect of dietary fatty acids on incorporation of long chain polyunsaturated fatty acids and conjugated linoleic acid in lamb, beef and pork meat: a review. *Anim Feed Sci Tech*, 2004, 113: 199–221
- 38 Abedi E, Sahari M A. Long-chain polyunsaturated fatty acid sources and evaluation of their nutritional and functional properties. *Food Sci Nutr*, 2014, 2: 443–463
- 39 Harnack K, Andersen G, Somoza V. Quantitation of alpha-linolenic acid elongation to eicosapentaenoic and docosahexaenoic acid as affected by the ratio of n6/n3 fatty acids. *Nutr Metab*, 2009, 6: 8
- 40 Brenna J T, Salem Jr. N, Sinclair A J, et al. α -Linolenic acid supplementation and conversion to n-3 long-chain polyunsaturated fatty acids in humans. *Prostaglandins Leukot Essent Fatty Acids*, 2009, 80: 85–91
- 41 Elkin R G, Harvatine K J. A review of recent studies on the enrichment of eggs and poultry meat with omega-3 polyunsaturated fatty acids: novel findings and unanswered questions. *Poult Sci*, 2023, 102: 102938–102951
- 42 Jeon J J, Kim H J, Kang H K, et al. Effects of dietary thraustochytrid *Schizochytrium* sp. and other omega-3 sources on growth performance, carcass characteristics, and meat quality of broilers. *Animals*, 2022, 12: 1166–1178
- 43 Long S, Liu S, Wu D, et al. Effects of dietary fatty acids from different sources on growth performance, meat quality, muscle fatty acid deposition, and antioxidant capacity in broilers. *Animals*, 2020, 10: 508–520
- 44 Konieczka P, Czauderna M, Smulikowska S. The enrichment of chicken meat with omega-3 fatty acids by dietary fish oil or its mixture with rapeseed or flaxseed—effect of feeding duration. *Anim Feed Sci Tech*, 2017, 223: 42–52
- 45 Ebrahimi M, Rajion M A, Jafari S, et al. Effects of dietary n-6: n-3 polyunsaturated fatty acid ratios on meat quality, carcass characteristics, tissue fatty acid profiles, and expression of lipogenic genes in growing goats. *PLoS ONE*, 2018, 13: e0188369
- 46 Carragher J F, Mühlhäusler B S, Geier M S, et al. Effect of dietary ALA on growth rate, feed conversion ratio, mortality rate and breast meat

- omega-3 LCPUFA content in broiler chickens. *Anim Prod Sci*, 2016, 56: 815–823
- 47 Keegan J D, Fusconi G, Morlacchini M, et al. Comparing docosahexaenoic acid supplementation strategies in terms of broiler tissue enrichment, productivity, and cost. *J Appl Poult Res*, 2020, 29: 636–652
- 48 Specht-Overholt S, Romans J R, Marchello M J, et al. Fatty acid composition of commercially manufactured omega-3 enriched pork products, haddock, and mackerel. *J Anim Sci*, 1997, 75: 2335–2343
- 49 Huang C, Chiba L I, Magee W E, et al. Effect of flaxseed oil, poultry fat, and vitamin E supplementation on physical and organoleptic characteristics and fatty acid profile of pork, and expression of genes associated with lipid metabolism. *Livestock Sci*, 2020, 231: 103849–103857
- 50 Jaturasitha S, Wudthithumkanaporn Y, Rurksasen P, et al. Enrichment of pork with omega-3 fatty acids by tuna oil supplements: effects on performance as well as sensory, nutritional and processing properties of pork. *Asian Australas J Anim Sci*, 2002, 15: 1622–1633
- 51 Kalbe C, Priepke A, Nürnberg G, et al. Effects of long-term microalgae supplementation on muscle microstructure, meat quality and fatty acid composition in growing pigs. *Anim Physiol Nutr*, 2019, 103: 574–582
- 52 Coelho D, Pestana J, Almeida J M, et al. A high dietary incorporation level of *Chlorella vulgaris* improves the nutritional value of pork fat without impairing the performance of finishing pigs. *Animals*, 2020, 10: 2384–2401
- 53 Kim C, Kim J, Oh Y, et al. Effects of flaxseed diets on performance, carcass characteristics and fatty acid composition of Hanwoo steers. *Asian Australas J Anim Sci*, 2009, 22: 1151–1159
- 54 Mapiye C, Aalhus J L, Turner T D, et al. Effects of feeding flaxseed or sunflower-seed in high-forage diets on beef production, quality and fatty acid composition. *Meat Sci*, 2013, 95: 98–109
- 55 Hwang J A, Islam M M, Ahmed S T, et al. Seamustard (*Undaria pinnatifida*) improves growth, immunity, fatty acid profile and reduces cholesterol in Hanwoo steers. *Asian Australas J Anim Sci*, 2014, 27: 1114–1123
- 56 Hopkins D L, Clayton E H, Lamb T A, et al. The impact of supplementing lambs with algae on growth, meat traits and oxidative status. *Meat Sci*, 2014, 98: 135–141
- 57 Díaz M T, Pérez C, Sánchez C I, et al. Feeding microalgae increases omega 3 fatty acids of fat deposits and muscles in light lambs. *J Food Compos Anal*, 2017, 56: 115–123
- 58 López-Ferrer S, Baucells M D, Barroeta A C, et al. n-3 enrichment of chicken meat. 1. Use of very long-chain fatty acids in chicken diets and their influence on meat quality: fish oil. *Poult Sci*, 2001, 80: 741–752
- 59 Wang L, Huang Y, Wang Y, et al. Effects of polyunsaturated fatty acids supplementation on the meat quality of pigs: a meta-analysis. *Front Nutr*, 2021, 8: 746765–746777
- 60 Mapiye C, Turner T D, Rolland D C, et al. Adipose tissue and muscle fatty acid profiles of steers fed red clover silage with and without flaxseed. *Livestock Sci*, 2013, 151: 11–20
- 61 González L, Moreno T, Bispo E, et al. Effect of supplementing different oils: Linseed, sunflower and soybean, on animal performance, carcass characteristics, meat quality and fatty acid profile of veal from “Rubia Gallega” calves. *Meat Sci*, 2014, 96: 829–836
- 62 Ehr I J, Persia M E, Bobeck E A. Comparative omega-3 fatty acid enrichment of egg yolks from first-cycle laying hens fed flaxseed oil or ground flaxseed. *Poult Sci*, 2017, 96: 1791–1799
- 63 Lee M R F, Tweed J K S, Moloney A P, et al. The effects of fish oil supplementation on rumen metabolism and the biohydrogenation of unsaturated fatty acids in beef steers given diets containing sunflower oil. *Anim Sci*, 2005, 80: 361–367
- 64 Oliveira E A, Sampaio A A M, Henrique W, et al. Quality traits and lipid composition of meat from Nellore young bulls fed with different oils either protected or unprotected from rumen degradation. *Meat Sci*, 2012, 90: 28–35
- 65 McDonald I W, Scott T W. Foods of ruminant origin with elevated content of polyunsaturated fatty acids. *World Rev Nutr Diet*, 1977, 144–207
- 66 Verma A K, Rajkumar V, Kumar R, et al. Effect of omega fatty acid-rich oil blend supplementation on the growth, carcass, meat quality, and gene expression of Barbari goats. *Euro J Lipid Sci Tech*, 2023, 125: e2300143
- 67 Cal-Pereyra L, González-Montaña J R, Neimaur Fernández K, et al. Effects of ewe’s diet supplementation with polyunsaturated fatty acids on meat lipid profile of suckling lambs. *Agriculture*, 2023, 13: 710–721
- 68 mila P, Kishore N, Sihag S, et al. Effect of linseed oil supplementation on hen day egg production, body weight, egg shape index, economics and egg quality in layers. *Int J Curr Microbiol App Sci*, 2017, 6: 2005–2016
- 69 Aguillón-Páez Y J, Romero L A, Diaz G J. Effect of full-fat sunflower or flaxseed seeds dietary inclusion on performance, egg yolk fatty acid profile and egg quality in laying hens. *Anim Nutr*, 2020, 6: 179–184

- 70 Attia Y A, Al-Harhi M A, Al-Sagan A A, et al. Dietary supplementation with different ω -6 to ω -3 fatty acid ratios affects the sustainability of performance, egg quality, fatty acid profile, immunity and egg health indices of laying hens. *Agriculture*, 2022, 12: 1712–1724
- 71 Mens A J W, van Krimpen M M, Kar S K, et al. Enriching table eggs with n-3 polyunsaturated fatty acids through dietary supplementation with the phototrophically grown green algae *Nannochloropsis limnetica*: effects of microalgae on nutrient retention, performance, egg characteristics and health parameters. *Poult Sci*, 2022, 101: 101869–101882
- 72 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
- 73 Radanović A, Kralik G, Drenjančević I, et al. n-3 PUFA enriched eggs as a source of valuable bioactive substances. *Foods*, 2023, 12: 4202–4215
- 74 Irawan A, Ningsih N, Hafizuddin N, et al. Supplementary n-3 fatty acids sources on performance and formation of omega-3 in egg of laying hens: a meta-analysis. *Poult Sci*, 2022, 101: 101566–101578
- 75 Neijat M, Eck P, House J D. Impact of dietary precursor ALA versus preformed DHA on fatty acid profiles of eggs, liver and adipose tissue and expression of genes associated with hepatic lipid metabolism in laying hens. *Prostaglandins Leukot Essent Fatty Acids*, 2017, 119: 1–17
- 76 Kralik G, Kralik Z, Grčević M, et al. Fatty acid profile of eggs produced by laying hens fed diets containing different shares of fish oil. *Poult Sci*, 2021, 100: 101379–101387
- 77 Yalçın H, Ünal M K. The enrichment of hen eggs with ω -3 fatty acids. *J Med Food*, 2010, 13: 610–614
- 78 Si X Y, Wang H, Guo X Q, et al. Effects of different supplemental levels of yeast selenium in flaxseed diets on liver antioxidant capacity, yolk fatty acid composition and egg selenium content of laying hens (in Chinese). *Chin J Anim Nutr*, 2020, 32: 2138–2147 [司雪阳, 王浩, 郭晓青, 等. 亚麻籽饲料中添加不同水平酵母硒对蛋鸡肝脏抗氧化能力、蛋黄脂肪酸组成和蛋中硒含量的影响. *动物营养学报*, 2020, 32: 2138–2147]
- 79 Tadesse D, Retta N, Girma M, et al. Yolk fatty acid content, lipid health indices, and oxidative stability in eggs of slow-growing sasso chickens fed on flaxseed supplemented with plant polyphenol extracts. *Foods*, 2023, 12: 1819–1835
- 80 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]
- 81 Yu J, Zhou Y, Chen L, et al. Effects of dietary supplementation of extruded flaxseed on milk quality and milk fatty acids of dairy cows (in Chinese). *Feed Rev*, 2017, 2: 5–8 [余婕, 周源, 程蕾, 等. 日粮中添加膨化亚麻籽对奶牛乳品质及脂肪酸组成的影响. *饲料博览*, 2017, 2: 5–8]
- 82 Oliveira M, de Palma A S V, dos Reis B R, et al. Inclusion of soybean and linseed oils in the diet of lactating dairy cows makes the milk fatty acid profile nutritionally healthier for the human diet. *PLoS ONE*, 2021, 16: e0246357
- 83 Thanh L P, Suksombat W. Milk yield, composition, and fatty acid profile in dairy cows fed a high-concentrate diet blended with oil mixtures rich in polyunsaturated fatty acids. *Asian Australas J Anim Sci*, 2015, 28: 796–806
- 84 Moate P J, Williams S R O, Hannah M C, et al. Effects of feeding algal meal high in docosahexaenoic acid on feed intake, milk production, and methane emissions in dairy cows. *J Dairy Sci*, 2013, 96: 3177–3188
- 85 Gebreyowhans S, Lu J, Zhang S, et al. Dietary enrichment of milk and dairy products with n-3 fatty acids: a review. *Int Dairy J*, 2019, 97: 158–166
- 86 Stamey J A, Shepherd D M, de Veth M J, et al. Use of algae or algal oil rich in n-3 fatty acids as a feed supplement for dairy cattle. *J Dairy Sci*, 2012, 95: 5269–5275
- 87 Food Safety and Inspection Service. FSIS-GD-2016-0009. Guidance on the labeling of omega fatty acid claims on meat, poultry and egg products. 2016
- 88 European Commission. Nutrition and health claims made on foods: 02006r1924-20141213. 2014
- 89 Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. NY/T 4174-2022. General rules for biofortification of edible agro-products (in Chinese). 2022 [中华人民共和国农业部. NY/T 4174-2022. 食用农产品生物营养强化通则. 2022]
- 90 Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. NY/T 4069-2021. omega-3 polyunsaturated fatty acid fortified egg (in Chinese). 2021 [中华人民共和国农业部. NY/T 4069-2021. ω -3多不饱和脂肪酸强化鸡蛋. 2021]
- 91 Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. NY/T 4070-2021. Technical specification for production omega-3 polyunsaturated fatty acid fortified egg (in Chinese). 2021 [中华人民共和国农业部. NY/T 4070-2021. ω -3多不饱和脂肪酸强化鸡蛋生产技术规范. 2021]

Advances in the application of biofortification research on omega-3 polyunsaturated fatty acids in livestock products

ZHOU LongZhu, LI PingYang, ZHAO LiYuan, YU YaNan, 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 authors E-mail: tangchaohua@caas.cn; zhangjunmin@caas.cn*

Omega-3 polyunsaturated fatty acids (ω -3 PUFAs) are essential nutrients for both animals and humans, playing a crucial role in maintaining bodily balance and preventing various chronic and metabolic diseases. However, there is currently a structural deficiency of ω -3 PUFAs among the Chinese residents. With the increasing attention to healthy diet, increasing the intake of ω -3 PUFAs has become an important nutritional goal. Livestock products are significant components of the human diet, and numerous studies have confirmed that adding ω -3 PUFAs-rich ingredients to animal feed can significantly increase the content of ω -3 PUFAs in poultry products. Therefore, livestock products are expected to serve as carriers for the nutritional fortification of ω -3 PUFAs, providing an effective means to enhance the intake of ω -3 PUFAs. This article reviews the recommended dietary intake of ω -3 PUFAs and the current intake status among the Chinese residents, as well as the levels of ω -3 PUFAs in different diets, the availability of ω -3 PUFAs resources in livestock and poultry feed, and the research status of biofortification of ω -3 PUFAs in livestock products, so as to provide practical guidance and scientific basis for further research and development of biofortification in livestock products.

omega-3 polyunsaturated fatty acids, livestock products, biofortification

doi: [10.1360/SSV-2024-0114](https://doi.org/10.1360/SSV-2024-0114)