

ω -3 多不饱和脂肪酸对奶牛生理功能的影响及其调控机制的研究进展

黄国欣^{1,2} 张养东^{1,2} 郑楠^{1,2} 王加启^{1,2*}

(1. 中国农业科学院北京畜牧兽医研究所,农业部奶产品质量安全风险评估实验室(北京),北京 100193;

2. 中国农业科学院北京畜牧兽医研究所,动物营养学国家重点实验室,北京 100193)

摘要: ω -3 多不饱和脂肪酸是奶牛机体必需的脂肪酸,对维持奶牛机体健康发挥着重要作用,富含 ω -3 多不饱和脂肪酸的牛奶在维持人体健康上也发挥着重要的促进作用。本文针对 ω -3 多不饱和脂肪酸对奶牛繁殖性能、瘤胃内环境和生产性能的影响,以及富含 ω -3 多不饱和脂肪酸牛奶的生产进行综述。

关键词: ω -3 多不饱和脂肪酸;瘤胃内环境;生产性能;繁殖;牛奶

中图分类号: S816

文献标识码: A

文章编号: 1006-267X(2019)01-0032-10

随着人们对脂肪营养研究的不断深入,脂肪对人类或动物的健康作用逐渐引起人们的兴趣,脂肪中包含饱和脂肪酸与不饱和脂肪酸,其中不饱和脂肪酸包括单不饱和脂肪酸与多不饱和脂肪酸,多不饱和脂肪酸分为 ω -3、 ω -6、 ω -7、 ω -9 多不饱和脂肪酸。多不饱和脂肪酸中的 ω -3 多不饱和脂肪酸为动物体所必需的脂肪酸,主要包括 α -亚麻酸(顺-9,12,15-C18:3;ALA)、二十碳五烯酸(顺-5,8,11,14,17-C20:5;EPA)和二十二碳六烯酸(顺-4,7,11,13,16,19-C22:6;DHA),此外还有十八碳四烯酸(顺-6,9,12,15-C18:4;SDA)、二十碳四烯酸(顺-8,11,14,17-C20:4;ETA)、二十二碳五烯酸(顺-7,10,13,16,19-C22:5;DPA)等。

目前, ω -3 多不饱和脂肪酸广泛应用于动物生产上,如给妊娠母羊补饲 EPA 和 DHA 能够增加羔羊的初生重^[1],给动物补饲含 DHA 的微藻(microalgae),能够提高猪、家禽、牛等动物的肉品质^[2]。 ω -3 多不饱和脂肪酸在奶牛方面的研究主要集中在其对繁殖与生产的影响方面。已有试

验证明 ω -3 多不饱和脂肪酸能够提高奶牛的繁殖能力,一方面, ω -3 多不饱和脂肪酸能够改善公牛的精子质量,同时也能够改善解冻后精子的质量^[3],提高奶牛的受孕能力;另一方面, ω -3 多不饱和脂肪酸能够提高母牛产后恢复能力,从而提高奶牛生产性能。饲料中的 ω -3 多不饱和脂肪酸能够提高乳中 ω -3 多不饱和脂肪酸含量,为人类提供富含 ω -3 多不饱和脂肪酸的食物。 ω -3 多不饱和脂肪酸是人体重要的免疫素,对心血管疾病、肿瘤、糖尿病、肾脏疾病等的预防及治疗具有积极作用^[4]。 ω -3 多不饱和脂肪酸存在于哺乳动物的细胞膜中,影响细胞的各种功能,进一步对脂质和蛋白质的代谢起调节作用^[5]。本文主要从 ω -3 多不饱和脂肪酸对奶牛的繁殖性能、瘤胃内环境和生产性能的影响以及含 ω -3 多不饱和脂肪酸牛奶的生产等方面进行综述。

1 ω -3 多不饱和脂肪酸对奶牛繁殖性能的影响

近年来,人们发现饲料中的脂肪对于奶牛生

收稿日期:2018-06-11

基金项目:国家自然科学基金项目(31601963);现代农业产业技术体系专项资金(CARS-36);公益性行业(农业)科研专项项目“生鲜乳质量安全评价技术与生产规程”(201403071);中国农业科学院科技创新工程(ASTIP-IAS12)

作者简介:黄国欣(1991—),男,河北邢台人,博士研究生,研究方向为反刍动物营养。E-mail: huangguoxin1991@163.com

* 通信作者:王加启,研究员,博士生导师,E-mail: jiaqi wang@vip.163.com

育力的影响可能是直接作用,而不是通过调节能量平衡影响奶牛的生育力^[6]。脂肪酸可能通过改变细胞膜成分和细胞膜的流动性来影响生殖组织的生长,Zeron 等^[7]发现细胞膜的流动性能够改变营养成分以及其他生物因子向细胞的转移,从而影响组织的生物功能。

1.1 对公牛繁殖性能的影响

随着人工授精技术的普及,人工授精成为目前奶牛场主要的配种方法,因此精子品质直接反映公牛的繁殖性能。以前的研究主要集中于调节饲料中能量提高公牛的繁殖能力,如添加油脂等改善公牛的生产性能^[8]。但是,随着人们对脂肪与繁殖关系研究地不断深入,不饱和脂肪酸的作用逐渐引起研究人员的关注,尤其是 ω -3 多不饱和脂肪酸^[9]。

研究表明,饲料中添加 ω -3 多不饱和脂肪酸能够改善公牛的生产性能,提高公牛精子质量。精子表面脂膜中富含不饱和脂肪酸^[10],这些不饱和脂肪酸在维持精子细胞膜的流动性以及精卵细胞的结合等方面发挥着重要作用,尤其是精子细胞膜中的 DHA,有试验表明饲喂富含 DHA 的饲料能够提高精子活力^[11]。精子活力的提高能够提高母牛的受精率。Byrne 等^[12]研究发现饲料中添加 ω -3 多不饱和脂肪酸不但能够提高精子活力,还能提高精子解冻之后的活力。 ω -3 多不饱和脂肪酸除了对精子活力产生影响外,还对精子的畸形率有影响。Khoshvaght 等^[3]发现,在奶牛饲料中添加 12% (风干基础) 鱼油后,精子的畸形率有降低趋势,且随着试验期的延长,降低趋势越明显,但是 Tran 等^[13]却发现在奶牛饲料中添加 4.67% 亚麻籽油后对精子的畸形率并未产生显著影响,这可能是因为鱼油与亚麻籽油所含有的 ω -3 多不饱和脂肪的种类不同,鱼油中主要是 EPA 与 DHA,而亚麻籽油中主要是 ALA,具体的机制还有待进一步的研究。

1.2 对母牛繁殖性能的影响

除了用于改善公牛的繁殖性能外, ω -3 多不饱和脂肪酸在改善母牛生产性能方面也发挥着重要作用,因此 ω -3 多不饱和脂肪酸被广泛添加到奶牛饲料中用于提高母牛的繁殖性能^[14-17]。已有试验证明 ω -3 多不饱和脂肪酸能够对卵泡的发育和排卵前卵泡的状态产生影响,卵泡的发育情况直接影响动物的繁殖状态,如 Robinson 等^[18]发现在

饲料中添加 ω -3 (主要为 ALA) 与 ω -6 多不饱和脂肪酸 [主要为亚油酸 (顺-9,12-C18:2; LA)] 均可增加母牛体内中等卵泡的数量;Ponter 等^[19]发现与富含 ω -6 多不饱和脂肪酸 (主要为 LA) 的大豆相比,补饲富含 ω -3 多不饱和脂肪酸 (主要为 ALA) 的亚麻籽后母牛体内的小卵泡数量增加;Moussavi 等^[20]发现,补饲一定量的鱼油能够增加母牛体内小卵泡数量;Moallem 等^[21]发现,补饲富含 ALA 的亚麻籽能够改善奶牛卵泡的形成以及卵母细胞的受精过程。但是 Vlcek 等^[22]每天给每头奶牛补饲 100 g 含富含 DHA 的藻类 (DHA 含量为干物质的 10%) 制品后发现,DHA 对卵巢大小没有显著影响,这种差异可能与奶牛补饲的油脂量有关系,Robinson 等^[18]的试验中油脂的补饲量为 320 g/kg, Ponter 等^[19]的试验中油脂的添加量分别为饲料的 1.25%、2.50%、5.00%, Moussavi 等^[20]的试验中油脂类物质的添加量分别为饲料的 1.25%、2.50%、5.00%, Moallem 等^[21]的试验中每头奶牛每天油脂的补饲量分别为 300 和 700 g,而 Vlcek 等^[22]试验中每头奶牛每天油脂的补饲量为 100 g,仅相当于干物质采食量的 0.5%,可能正是因为油脂补饲量低导致 DHA 对机体的积极影响被抵消。

ω -3 多不饱和脂肪酸对母牛的妊娠有促进作用, ω -3 多不饱和脂肪酸能够抑制前列腺素 2a 分泌^[6,23],尤其是长链 ω -3 多不饱和脂肪酸如 EPA、DHA 等,与前列腺素 2a 存在竞争关系,能够抑制前列腺素 2a 的分泌。而前列腺素分泌受到抑制后,能够保证动物体内存在一定数量的孕酮,有利于奶牛的受精以及胚胎的着床与存活。Dirandeh 等^[16]研究发现,与补饲大豆相比,奶牛产后 40~120 d 补饲亚麻籽能够提高妊娠率。Cheng 等^[24]的研究也发现补饲 ω -3 多不饱和脂肪酸对于前列腺素的分泌有抑制作用,但是作用有限,而补饲 ω -6 不饱和脂肪酸的抑制作用效果更为明显。这可能与 ω -6 与 ω -3 多不饱和脂肪酸的比例有关系。Dirandeh 等^[16]试验中添加亚麻籽组的饲料中 ω -6 与 ω -3 多不饱和脂肪酸的比例为 1.2:1.0,添加大豆组的饲料中 ω -6 与 ω -3 多不饱和脂肪酸的比例为 4.2:1.0, Cheng 等^[24]试验中添加亚麻油组的饲料中 ω -6 与 ω -3 多不饱和脂肪酸的比例为 0.5:1.0,添加豆油组的饲料中 ω -6 与 ω -3 多不饱和脂肪酸的比例为 2.6:1.0,因此饲料中 ω -6 与 ω -3

多不饱和脂肪酸可能在一定比例下有利于抑制前列腺素分泌,而一旦 ω -3多不饱和脂肪酸所占比例过高,其抑制效果则降低,但是具体的影响机理有待进一步的探究。

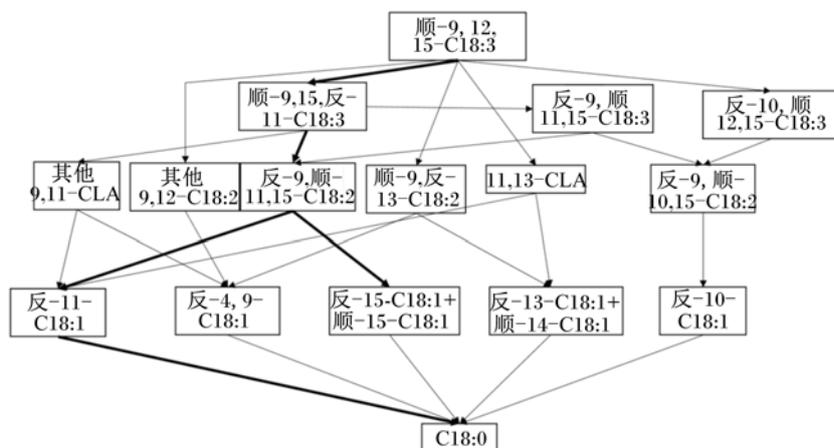
2 ω -3多不饱和脂肪酸对奶牛瘤胃内环境的影响

ω -3多不饱和脂肪酸等多不饱和脂肪酸进入瘤胃后会引发瘤胃的生物氢化作用加强。瘤胃脂肪的生物氢化作用是指饲料中的不饱和脂肪酸进入瘤胃后,在瘤胃中转化为饱和脂肪酸或降低不饱和脂肪酸饱和度的作用。目前对于瘤胃的生物氢化作用的原因有2种说法,一种是降低不饱和脂肪酸的能量作用^[25],另一种是不饱和脂肪酸的脱毒作用^[26],多数研究人员认为瘤胃的生物氢化是瘤胃的自我保护作用,因此脱毒作用的说法得到多数研究人员的认同。瘤胃中不饱和脂肪酸的生物氢化作用主要是由瘤胃微生物引起的,这些微生物主要有细菌、真菌和原虫三大类,其中瘤胃细菌起主要作用,能产生氢化作用的细菌主要分为A类和B类,其中A类细菌主要氢化LA与ALA,以反式异油酸(反-11-C18:1;TVA)为主要产物,而B类细菌主要氢化LA与ALA,以及瘤胃氢化的中间产物TVA产生硬脂酸(C18:0)^[27]。有试验发现溶纤维素丁酸弧菌(*Butyrivibrio fibrisolvens*)与白色瘤胃球菌(*Ruminococcus albus*)为参与瘤胃生物氢化作用的主要细菌^[28]。真菌在瘤胃中的数量较少,与细菌相比氢化效率低,因此在瘤胃氢化过程中贡献小^[29],关于真菌与脂肪生物氢化的研究相对较少。此外,瘤胃的生物氢化作用还受瘤胃pH的影响,当pH低于6时瘤胃的生物氢化作用受到抑制。

虽然多数研究倾向于不饱和脂肪酸对瘤胃有毒害作用,但是也有研究者发现生物氢化作用在一定程度上也可应用于奶牛生产,如对 ω -3多不饱和脂肪酸ALA的利用。ALA含有3个不饱和双键,ALA在进入瘤胃后会发生生物氢化作用(图1)^[30-31],通过生物氢化作用将ALA转化为共轭亚油酸等其他脂肪酸,然后转运至乳中,可以提高乳中共轭亚油酸的含量^[32-33],而未被氢化的ALA一方面被牛体利用,另一方面在肝等组织中发生碳链的延长和去饱和生成EPA、DHA等^[34]转运到乳中,提高乳中 ω -3多不饱和脂肪酸的含量,

而其他 ω -3多不饱和脂肪酸也经过生物氢化作用转化为其他物质。除此之外,有研究者认为,多不饱和脂肪酸在氢化的过程中能够利用瘤胃发酵产生的氢,减少甲烷的产生。Fievez等^[35]在体外试验中发现,添加DHA能够降低20%的甲烷生成量,减少能量的浪费。但是Moate等^[36]在奶牛饲料中添加不同剂量的DHA后发现,DHA对甲烷的产生没有显著影响。产生上述不同的结果可能与饲料的组成结构有一定的关系,粗饲料会促进甲烷的产生,而Moate等^[36]试验中粗饲料添加量大,导致DHA的有利作用被削弱。另外,Moate等^[36]还发现瘤胃中原虫的含量发生了改变,与之相同,Fievez等^[35]也发现多不饱和脂肪酸能够影响瘤胃微生物组成。而瘤胃微生物组成的变化会进一步影响瘤胃内挥发性脂肪酸的产生。Soder等^[37]在采用4单元双流连续发酵系统评价补饲亚麻籽对奶牛饲料营养物质消化、瘤胃发酵特征以及其他指标影响的试验中发现,补饲10%的亚麻籽能降低发酵系统中乙酸与丙酸的比例,同时Neveun等^[38]在饲养试验中也发现补饲12.5%的亚麻籽能降低奶牛瘤胃中乙酸与丙酸的比例,Frutos等^[39]在饲养试验中发现补饲鱼油在降低奶牛瘤胃中乙酸与丙酸比例的同时,还会降低瘤胃中总挥发性脂肪酸的含量。但是Silva等^[40]的试验却发现无论是添加富含 ω -3多不饱和脂肪酸的亚麻籽还是嘉种籽,瘤胃连续发酵装置中的挥发性脂肪酸含量均没有发生显著变化。Silva等^[41]的试验中亚麻籽的添加量为5.0%、嘉种籽添加量为5.5%,而Soder等^[37]的试验中亚麻籽的添加量为10%,Frutos等^[39]的试验中亚麻籽的添加量为12.5%,因此产生不同的结果可能是由于Silva等^[40]的试验中油脂的添加量相对于其他试验较少,导致添加的油脂没有对瘤胃中挥发性脂肪酸产生影响。

总的来说,提高中饲料 ω -3多不饱和脂肪酸的含量能够增强瘤胃内生物氢化作用,而这种生物氢化作用能够产生出共轭亚油酸等物质,同时生物氢化作用也可以在一定程度上减少甲烷的产生,减少能量的浪费。 ω -3多不饱和脂肪酸除了引起瘤胃发生生物氢化作用外,还会引起瘤胃内微生物的组成发生变化,从而改变瘤胃内发酵状况,在一定程度上改变瘤胃内挥发性脂肪酸的组成,并进一步影响奶牛的生产性能。



加粗箭头所指示的流程为 α -亚麻酸在瘤胃中主要的氢化途径,其他箭头为根据 α -亚麻酸纯品在体外发酵培养过程中的产物所推论出来的途径。

The bold arrows indicate the main hydrogenation pathway of ALA in the rumen, and the other arrows are the pathways inferred from the products of ALA purity *in vitro* fermentation.

图 1 瘤胃生物氢化过程

Fig.1 Biohydrogenation pathways in rumen^[30-31]

3 ω -3 多不饱和脂肪酸对奶牛生产性能的影响

3.1 对产奶量的影响

众多的研究表明添加脂肪能够提高奶牛的产奶量,然而由于添加的脂肪种类不同,有些脂肪会影响奶牛的采食量,从而影响奶牛的产奶量。不饱和脂肪酸比饱和脂肪酸更容易抑制奶牛的采食量^[41],添加 ω -3 多不饱和脂肪酸对产奶量的影响结果不一。有研究者发现在奶牛饲料中添加 ω -3 多不饱和脂肪酸可提高产奶量,例如:Keady 等^[42]在给奶牛补饲富含 EPA 与 DHA 的鱼油后发现,虽然采食量下降,但是产奶量有明显的提高;Sinedino 等^[43]每天给每头奶牛补饲 100 g 富含 DHA 的藻类后发现,奶牛的采食量没有发生显著变化,而产奶量每天增加了 0.9 kg。也有研究者发现在奶牛饲料中添加 ω -3 多不饱和脂肪酸对产奶量没有显著影响,例如:Moate 等^[36]每天给每头奶牛分别补饲 0、25、50、75 g 的 DHA 后发现,添加 DHA 对奶牛的产奶量没有显著影响,但是采食量出现下降;Neven 等^[38]分别用添加亚麻籽的饲料与不添加亚麻籽的饲料饲喂奶牛,结果也显示对奶牛的产奶量没有显著影响;Stergiadis 等^[44]给奶牛补饲亚麻籽,进行为期 6 周的试验后也发现补饲亚麻

籽对产奶量没有显著影响;此外,Collomb 等^[45]和 Cant 等^[46]在饲料中添加不同量的含 ω -3 多不饱和脂肪酸脂肪源后均发现提高饲料中 ω -3 多不饱和脂肪酸的含量对奶牛的产奶量没有显著影响。总的来说,由于补饲的含 ω -3 多不饱和脂肪酸的脂肪源不同,对奶牛饲料适口性的影响不同,对采食量影响也不同,但是总的能量摄入差异不大,因此在多数情况下不会导致奶牛产奶量下降。

3.2 对乳脂的影响

饲料对乳脂率以及乳脂产量的影响较大,其中纤维含量与多不饱和脂肪酸的含量为主要的影响因素,饲料中多数的多不饱和脂肪酸会降低乳脂率和乳脂产量。Gómez-Cortés 等^[31]给奶牛补饲富含 ALA 的橡胶籽和亚麻籽后发现乳脂率显著降低,Moate 等^[36]在奶牛饲料中添加富含 DHA 的藻类后发现乳脂率以及日乳脂产量均降低,Sinedino 等^[43]在奶牛饲料中补饲 100 g 富含 DHA 的藻类后也有同样的发现,Calsamiglia 等^[47]发现奶牛饲料中添加大量的鱼油会引起乳脂率以及乳脂产量的下降。这主要是由于反式脂肪酸对乳脂的抑制作用^[48],尤其是反-10,顺-12-共轭亚油酸(反-10,顺-12-C18:2;反-10,顺-12-CLA),其被公认为是引起乳脂降低综合征的重要反式脂肪酸抑制因子。如图 1 所示,ALA 能够通过生物氢

化作用转化为反-10,顺-12-CLA,从而起到对乳脂的抑制作用。此外,其他 ω -3多不饱和脂肪酸也能够提高总反式脂肪酸以及CLA的含量。如Moate等^[36]试验中发现,奶牛饲粮添加DHA能够显著提高乳中总的反式脂肪酸以及反-10,顺-12-CLA。乳脂率的变化除了受到饲粮中多不饱和脂肪酸的影响外,与奶牛的生产状态也有一定的关系。Moussavi等^[20]在泌乳奶牛早期饲粮中添加富含 ω -3多不饱和脂肪酸的鱼粉后发现乳脂率没有发生显著变化。Santos等^[49]发现给产奶低于30 kg的奶牛补饲脂肪更容易引起乳脂率和乳脂产量的下降。补饲 ω -3多不饱和脂肪酸除了可引起乳脂率和乳脂产量的下降外,还会引起乳脂脂肪酸种类的变化,提高某些对人有益的脂肪酸的含量,从而提高牛奶的营养价值。Sinedino等^[43]给奶牛补饲富含DHA的藻类后发现,对照组每克乳脂脂肪酸中DHA含量为2 mg,而添加DHA组每克乳脂脂肪酸中DHA含量为242 mg。Moate等^[36]也发现,在奶牛饲粮中添加藻粉能够显著提高乳中 ω -3多不饱和脂肪酸的含量,尤其是EPA和DHA的含量。总的来说,奶牛补饲含 ω -3多不饱和脂肪酸的油脂多会引起乳脂率的下降,但这种下降也受到奶牛生产状态的影响。饲粮中脂肪酸的组成会影响乳中脂肪酸的组成,提高饲粮中某一脂肪酸的含量会导致乳中该脂肪酸含量的升高,因此可提高饲粮中 ω -3多不饱和脂肪酸的含量,从而生产出富含 ω -3多不饱和脂肪酸的牛奶,并进一步生产出富含 ω -3多不饱和脂肪酸的乳制品。

4 富含 ω -3多不饱和脂肪酸牛奶的研究

随着生活水平的不断提高,食物的营养保健特性也逐渐受到人们的关注,提高乳制品品质也日益引起了研究人员的关注。 ω -3多不饱和脂肪酸作为人体必需营养素,能够降低血清中甘油三酯和低密度脂蛋白胆固醇的含量,有利于人体的健康^[50]。长链 ω -3多不饱和脂肪酸如EPA和DHA,能够通过改变细胞与组织间的反应来促进生长发育,维持机体的健康。最近的研究表明EPA对于由肥胖引起的肝细胞癌有一定的治疗作用^[51],在控制饮食中能量的基础上补充DHA能够降低由肥胖引起的乳腺癌风险^[52]。在人的生命中 ω -3多不饱和脂肪酸的作用是显而易见的,这意味着,所有的人群都需要有足够的该营养物

质^[53]。因此,开发富含 ω -3多不饱和脂肪酸或某一种 ω -3多不饱和脂肪酸的牛奶,为人们提供具有特殊功能的乳制品,有利于改善人们的健康和生活水平。

影响乳中 ω -3多不饱和脂肪酸含量的主要因素是饲粮,动物体本身无法合成 ω -3多不饱和脂肪酸,尤其是ALA,而大于18碳的 ω -3多不饱和脂肪酸能够以ALA为前体物,主要在肝中去饱和延长生成EPA和DHA等长链脂肪酸(图2)^[54],但是合成量少,主要用于机体消耗。因此牛奶中的 ω -3多不饱和脂肪酸主要是从饲粮中获取的。因此,提高乳中 ω -3多不饱和脂肪酸含量的方法是在饲粮中添加含 ω -3多不饱和脂肪酸的物质,且乳中 ω -3多不饱和脂肪酸的含量随着饲粮中含 ω -3多不饱和脂肪酸的物质添加量的增加而增加。Yang等^[55]报道,通过十二指肠在奶牛的体内分别添加100、200和300 g的ALA后,发现乳中ALA含量随ALA添加量的增加呈线性提高。Donovan等^[56]在奶牛饲粮中分别添加1%、2%、3%的鱼油后,同样也发现乳中总 ω -3多不饱和脂肪酸的含量随着鱼油添加量的增加而线性提高。但是乳中 ω -3多不饱和脂肪酸的转运效率较低(图3)^[41,57-58], ω -3多不饱和脂肪酸在体内转运受多种因素的影响,包括瘤胃的生物氢化作用、小肠及淋巴组织等转运损失,以及动物体各器官内氧化供能和组织修复等利用,导致 ω -3多不饱和脂肪酸转运至乳中的效率低。Mattos等^[59]在试验中发现乳中EPA和DHA的转运效率分别是5.4%和7.6%。由图3可知,瘤胃的生物氢化作用严重影响乳中 ω -3多不饱和脂肪酸的转运效率。Bernal-Santos等^[60]分别通过皱胃和瘤胃添加富含SDA的大豆油后发现,通过皱胃添加大豆油能显著地提高乳中SDA以及其他 ω -3多不饱和脂肪酸的含量,而通过瘤胃添加大豆油对乳中各 ω -3多不饱和脂肪酸含量的影响不显著。

乳中 ω -3多不饱和脂肪酸除了含量与饲料中 ω -3多不饱和脂肪酸含量有关,其组成也与饲粮中 ω -3多不饱和脂肪酸组成有关。Sinedino等^[43]报道,给奶牛补饲100 g富含DHA的藻类后能够显著提高乳中DHA含量,乳中其他 ω -3多不饱和脂肪酸含量也有所提升,但是差异不显著。Torok等^[61]发现,给奶牛补饲DHA能够显著增加乳中DHA的含量,对乳中其他 ω -3多不饱和脂肪酸含

量没有显著影响, Vlcek 等^[22] 也有同样的发现。除了补饲富含 DHA 的物质外, 补饲其他 ω -3 多不饱和脂肪酸也有同样的效果, Pi 等^[33] 在试验中设定 4 个组, 分别是未添加橡胶籽油和亚麻籽油组、4% 橡胶籽油组、4% 亚麻籽油组和 2% 橡胶籽油+2% 亚麻籽油组, 其中橡胶籽油与亚麻籽油均富含 ALA, 试验发现无论是添加橡胶籽油还是亚麻籽油, 乳中的 ALA 含量均显著升高, 其中 4% 亚麻籽油组升高的最明显, 而乳中 EPA 含量降低。目前用于补饲的 ω -3 多不饱和脂肪酸的饲料来源可分为动物性与植物性饲料来源, 动物性饲料来源主要包括鱼粉、各种鱼油等, 植物性饲料来源主要包括亚麻籽及亚麻籽油、富含 DHA 的藻类、微藻以及嘉种籽等其他油料作物。其中鱼油主要提供长链 ω -3 多不饱和脂肪酸, 包括 EPA 和 DHA 等, 藻类和微藻含有丰富的 DHA, 而亚麻籽、亚麻籽油和嘉种籽含有丰富的 ALA。

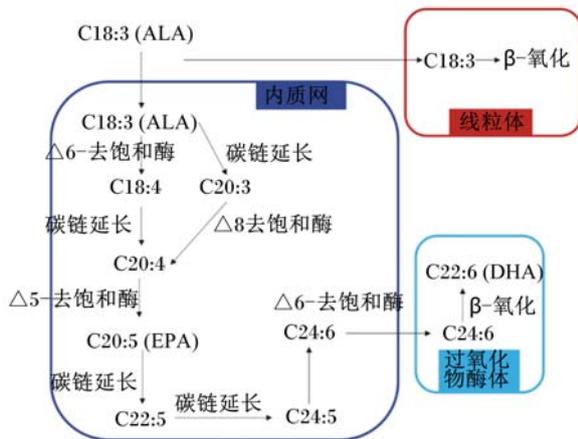


图 2 ALA 转化为长链 ω -3 多不饱和脂肪酸的通路

Fig.2 Biosynthetic conversion pathway of ALA into long chain ω -3 unsaturated fatty acids^[54]

总的来说, 乳中 ω -3 多不饱和脂肪酸随着饲料中 ω -3 多不饱和脂肪酸添加量的增加呈线性增加, 降低 ω -3 多不饱和脂肪酸在瘤胃中的生物氢化作用能够增加其在乳中的积累。通过调节饲料中 ω -3 多不饱和脂肪酸的组成和含量能够对乳中 ω -3 多不饱和脂肪酸的种类和含量进行调节, 从而生产出具有特有营养功能的乳制品。

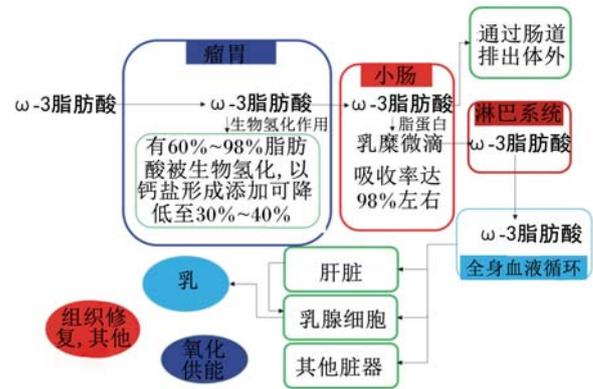


图 3 ω -3 多不饱和脂肪酸在反刍动物体内的转运
Fig.3 Transport of ω -3 unsaturated fatty acids in ruminants^[42,58-59]

5 小结

综上所述, ω -3 多不饱和脂肪酸作为动物体内必需的营养素, 在人和动物体内发挥着极其重要的作用, 目前人们发现在奶牛饲料中添加 ω -3 多不饱和脂肪酸不仅能够提高繁殖能力, 改善生产性能, 还能增加乳中 ω -3 多不饱和脂肪酸的含量, 为人们提供高品质的乳制品。但是乳中的 ω -3 多不饱和脂肪酸由于受多方面的影响, 导致转运效率较低, 探究 ω -3 多不饱和脂肪酸的作用机制以及提高乳中 ω -3 多不饱和脂肪酸的转运效率成为今后研究的趋势。

参考文献:

- [1] MARTIN A C C, COLEMAN D N, GARCIA L, et al. Effect of different fatty acid profile on the maternal and finishing diet on performance and carcass characteristics in lambs [J]. Journal of Animal Science, 2018, 96(Suppl.2):247-248.
- [2] MADEIRA M S, CARDOSO C, LOPES P A, et al. Microalgae as feed ingredients for livestock production and meat quality: a review [J]. Livestock Science, 2017, 205:111-121.
- [3] KHOSHVAGHT A, TOWHIDI A, ZARE-SHAHNEH A, et al. Dietary n-3 PUFAs improve fresh and post-thaw semen quality in Holstein bulls via alteration of sperm fatty acid composition [J]. Theriogenology, 2016, 85(5):807-812.
- [4] SAINI R K, KEUM Y S. Omega-3 and omega-6 polyunsaturated fatty acids: dietary sources, metabolism, and significance—a review [J]. Life Sciences, 2018,

- 203:255-267.
- [5] COLUSSI G, CATENA C, NOVELLO M, et al. Impact of omega-3 polyunsaturated fatty acids on vascular function and blood pressure: relevance for cardiovascular outcomes[J]. *Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases*, 2017, 27(3):191-200.
- [6] MATTOS R, STAPLES C R, THATCHER W W. Effects of dietary fatty acids on reproduction in ruminants[J]. *Reviews of Reproduction*, 2000, 5(1):38-45.
- [7] ZERON Y, SKLAN D, ARAV A. Effect of polyunsaturated fatty acid supplementation on biophysical parameters and chilling sensitivity of ewe oocytes[J]. *Molecular Reproduction and Development*, 2002, 61(2):271-278.
- [8] ZHUO Y, ZHOU D S, CHE L Q, et al. Feeding prepubescent gilts a high-fat diet induces molecular changes in the hypothalamus-pituitary-gonadal axis and predicts early timing of puberty[J]. *Nutrition*, 2014, 30(7/8):890-896.
- [9] SELVARAJU S, RAJU P, RAO S B N, et al. Evaluation of maize grain and polyunsaturated fatty acid (PUFA) as energy sources for breeding rams based on hormonal, sperm functional parameters and fertility[J]. *Reproduction, Fertility and Development*, 2012, 24(5):669-678.
- [10] MARTINEZ-SOTO J C, LANDERAS J, GADEA J. Spermatozoa and seminal plasma fatty acids as predictors of cryopreservation success[J]. *Andrology*, 2013, 1(3):365-375.
- [11] GHOLAMI H, CHAMANI M, TOWHIDI A, et al. Effect of feeding a docosahexaenoic acid-enriched nutraceutical on the quality of fresh and frozen-thawed semen in Holstein bulls[J]. *Theriogenology*, 2010, 74(9):1548-1558.
- [12] BYRNE C J, FAIR S, ENGLISH A M, et al. Dietary polyunsaturated fatty acid supplementation of young post-pubertal dairy bulls alters the fatty acid composition of seminal plasma and spermatozoa but has no effect on semen volume or sperm quality[J]. *Theriogenology*, 2017, 90:289-300.
- [13] TRAN L V, MALLA B A, SHARMA A N, et al. Effect of omega-3 and omega-6 polyunsaturated fatty acid enriched diet on plasma IGF-1 and testosterone concentration, puberty and semen quality in male buffalo[J]. *Animal Reproduction Science*, 2016, 173:63-72.
- [14] JAHANI-MOGHADAM M, MAHJOUBI E, DIRANDEH E. Effect of linseed feeding on blood metabolites, incidence of cystic follicles, and productive and reproductive performance in fresh Holstein dairy cows[J]. *Journal of Dairy Science*, 2015, 98(3):1828-1835.
- [15] BADIEI A, ALIVERDILOU A, AMANLOU H, et al. Postpartum responses of dairy cows supplemented with n-3 fatty acids for different durations during the periparturient period[J]. *Journal of Dairy Science*, 2014, 97(10):6391-6399.
- [16] DIRANDEH E, TOWHIDI A, ZEINOALDINI S, et al. Effects of different polyunsaturated fatty acid supplementations during the postpartum periods of early lactating dairy cows on milk yield, metabolic responses, and reproductive performances[J]. *Journal of Animal Science*, 2013, 91(2):713-721.
- [17] CALDARI-TORRES C, LOCK A L, STAPLES C R, et al. Performance, metabolic, and endocrine responses of periparturient Holstein cows fed 3 sources of fat[J]. *Journal of Dairy Science*, 2011, 94(3):1500-1510.
- [18] ROBINSON R S, PUSHPAKUMARA P G, CHENG Z, et al. Effects of dietary polyunsaturated fatty acids on ovarian and uterine function in lactating dairy cows[J]. *Reproduction*, 2002, 124(1):119-131.
- [19] PONTER A A, PARSY A E, SAADÉ M, et al. Effect of a supplement rich in linolenic acid added to the diet of post partum dairy cows on ovarian follicle growth, and milk and plasma fatty acid compositions[J]. *Reproduction Nutrition Development*, 2006, 46(1):19-29.
- [20] MOUSSAVI A R H, GILBERT R O, OVERTON T R, et al. Effects of feeding fish meal and n-3 fatty acids on milk yield and metabolic responses in early lactating dairy cows[J]. *Journal of Dairy Science*, 2007, 90(1):136-144.
- [21] MOALLEM U, SHAFRAN A, ZACHUT M, et al. Dietary α -linolenic acid from flaxseed oil improved folliculogenesis and IVF performance in dairy cows, similar to eicosapentaenoic and docosahexaenoic acids from fish oil[J]. *Reproduction*, 2013, 146(6):603-614.
- [22] VLCEK M, ANDRLIKOVA M, BARBATO O, et al. Supplementation of dairy cows with docosahexaenoic acid did not affect ovarian activity[J]. *Czech Journal of Animal Science*, 2017, 62(11):457-465.

- [23] ABAYASEKARA D R E, WATHES D C. Effects of altering dietary fatty acid composition on prostaglandin synthesis and fertility [J]. *Prostaglandins, Leukotrienes and Essential Fatty Acids*, 1999, 61(5): 275–287.
- [24] CHENG Z R, ROBINSON R S, PUSHPAKUMARA P G, et al. Effect of dietary polyunsaturated fatty acids on uterine prostaglandin synthesis in the cow [J]. *Journal of Endocrinology*, 2001, 171(3): 463–473.
- [25] LENNARZ W J. Lipid Metabolism in the bacteria [J]. *Advances in Lipid Research*, 1966, 4: 175–225.
- [26] KEMP P, LANDER D J, GUNSTONE F D. The hydrogenation of some *cis*- and *trans*-octadecenoic acids to stearic acid by a rumen *Fusocillus* sp. [J]. *British Journal of Nutrition*, 1984, 52(1): 165–170.
- [27] HOBSON P N, STEWART C S. The rumen microbial ecosystem [M]. Dordrecht: Springer, 1997.
- [28] KEMP P, WHITE R W, LANDER D J. The Hydrogenation of unsaturated fatty acids by five bacterial isolates from the sheep rumen, including a new species [J]. *Journal of General and Applied Microbiology*, 1975, 90(1): 100–114.
- [29] MAIA M R G, CHAUDHARY L C, FIGUERES L, et al. Metabolism of polyunsaturated fatty acids and their toxicity to the microflora of the rumen [J]. *Antonie van Leeuwenhoek*, 2007, 91(4): 303–314.
- [30] LOURENCO M, RAMOS-MORALES E, WALLACE R J. The role of microbes in rumen lipolysis and biohydrogenation and their manipulation [J]. *Animal*, 2010, 4(7): 1008–1023.
- [31] GÓMEZ-CORTÉS P, CÍVICO A, DE LA FUENTE M A, et al. Dietary linseed oil increases *trans*-10, *cis*-15:18:2 in caprine milk fat [J]. *Journal of Dairy Science*, 2017, 100(6): 4235–4240.
- [32] BU D P, WANG J Q, DHIMAN T R, et al. Effectiveness of oils rich in linoleic and linolenic acids to enhance conjugated linoleic acid in milk from dairy cows [J]. *Journal of Dairy Science*, 2007, 90(2): 998–1007.
- [33] PI Y, GAO S T, MA L, et al. Effectiveness of rubber seed oil and flaxseed oil to enhance the α -linolenic acid content in milk from dairy cows [J]. *Journal of Dairy Science*, 2016, 99(7): 5719–5730.
- [34] BÉZARD J, BLOND J P, BERNARD A, et al. The metabolism and availability of essential fatty acids in animal and human tissues [J]. *Reproduction Nutrition Development*, 1994, 34(6): 539–568.
- [35] FIEVEZ V, BOECKAERT C, VLAEMINCK B, et al. *In vitro* examination of DHA-edible micro-algae: 2. Effect on rumen methane production and apparent degradability of hay [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2007, 136(1/2): 80–95.
- [36] 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]. *Journal of Dairy Science*, 2013, 96(5): 3177–3188.
- [37] SODER K J, BRITO A F, RUBANO M D. Effect of supplementing orchardgrass herbage with a total mixed ration or flaxseed on fermentation profile and bacterial protein synthesis in continuous culture [J]. *Journal of Dairy Science*, 2013, 96(5): 3228–3237.
- [38] NEVEU C, BAURHOO B, MUSTAFA A. Effect of feeding extruded flaxseed with different grains on the performance of dairy cows and milk fatty acid profile [J]. *Journal of Dairy Science*, 2014, 97(3): 1543–1551.
- [39] FRUTOS P, TORAL P G, BELENGUER A, et al. Milk fat depression in dairy ewes fed fish oil: might differences in rumen biohydrogenation, fermentation, or bacterial community explain the individual variation? [J]. *Journal of Dairy Science*, 2018, 101(7): 6122–6132.
- [40] SILVA L G, BUNKERS J, PAULA E M, et al. Effects of flaxseed and chia seed on ruminal fermentation, nutrient digestibility, and long-chain fatty acid flow in a dual-flow continuous culture system [J]. *Journal of Animal Science*, 2016, 94(4): 1600–1609.
- [41] NRC. Nutrient requirements of dairy cattle [S]. 7th ed. Washington, D. C.: National Academies Press, 2001.
- [42] KEADY T W J, MAYNE C S, FITZPATRICK D A. Effects of supplementation of dairy cattle with fish oil on silage intake, milk yield and milk composition [J]. *Journal of Dairy Research*, 2000, 67(2): 137–153.
- [43] SINEDINO L D P, HONDA P M, SOUZA L R L, et al. Effects of supplementation with docosahexaenoic acid on reproduction of dairy cows [J]. *Reproduction*, 2017, 153(5): 707–723.
- [44] STERGIADIS S, LEIFERT C, SEAL C J, et al. Improving the fatty acid profile of winter milk from housed cows with contrasting feeding regimes by oilseed supplementation [J]. *Food Chemistry*, 2014, 164: 293–300.
- [45] COLLOMB M, SOLLBERGER H, BÜTIKOFER U,

- et al. Impact of a basal diet of hay and fodder beet supplemented with rapeseed, linseed and sunflowerseed on the fatty acid composition of milk fat [J]. *International Dairy Journal*, 2004, 14(6): 549-559.
- [46] CANT J P, FREDEEN A H, MACINTYRE T, et al. Effect of fish oil and monensin on milk composition in dairy cows [J]. *Canadian Journal of Animal Science*, 1997, 77(1): 125-131.
- [47] CALSAMIGLIA S, CAJA G, STERN M D, et al. Effects of ruminal versus duodenal dosing of fish meal on ruminal fermentation and milk composition [J]. *Journal of Dairy Science*, 1995, 78(9): 1999-2007.
- [48] DAVIS C L, BROWN R E, PHILLIPSON A T. Low-fat milk syndrome [C] // *Proceedings of the 3rd International Symposium*. Cambridge: Oriel Press, 1970.
- [49] SANTOS F A P, SANTOS J E P, THEURER C B, et al. Effects of rumen-undegradable protein on dairy cow performance: a 12-year literature review [J]. *Journal of Dairy Science*, 1998, 81(12): 3182-3213.
- [50] SIMOPOULOS A P. Omega-3 fatty acids in health and disease and in growth and development [J]. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 1991, 54(3): 438-463.
- [51] INOUE-YAMAUCHI A, ITAGAKI H, ODA H. Eicosapentaenoic acid attenuates obesity-related hepatocellular carcinogenesis [J]. *Carcinogenesis*, 2018, 39(1): 28-35.
- [52] MANNI A, EL-BAYOUMY K, THOMPSON H. Docosahexaenoic acid in combination with dietary energy restriction for reducing the risk of obesity related breast cancer [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2018, 19(1): 28.
- [53] CALDER P C. Very long chain omega-3 (n-3) fatty acids and human health [J]. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2014, 116(10): 1280-1300.
- [54] KIM K B, NAM Y A, KIM H S, et al. α -linolenic acid: nutraceutical, pharmacological and toxicological evaluation [J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2014, 70: 163-178.
- [55] YANG G, BU D P, WANG J Q, et al. Duodenal infusion of α -linolenic acid affects fatty acid metabolism in the mammary gland of lactating dairy cows [J]. *Journal of Dairy Science*, 2012, 95(10): 5821-5830.
- [56] DONOVAN D C, SCHINGOETHE D J, BAER R J, et al. Influence of dietary fish oil on conjugated linoleic acid and other fatty acids in milk fat from lactating dairy cows [J]. *Journal of Dairy Science*, 2000, 83(11): 2620-2628.
- [57] MATTOS R, STAPLES C R, ARTECHE A, et al. The effects of feeding fish oil on uterine secretion of PGF_{2 α} , milk composition, and metabolic status of periparturient Holstein cows [J]. *Journal of Dairy Science*, 2004, 87(4): 921-932.
- [58] 陈代文, 王恬. *动物营养与饲养学* [M]. 北京: 中国农业出版社, 2011.
- [59] MATTOS R, STAPLES C R, ARTECHE A, et al. The effects of feeding fish oil on uterine secretion of PGF_{2 α} , milk composition, and metabolic status of periparturient Holstein cows [J]. *Journal of Dairy Science*, 2004, 87(4): 921-932.
- [60] BERNAL-SANTOS G, O'DONNELL A M, VICINI J L, et al. Hot topic: enhancing omega-3 fatty acids in milk fat of dairy cows by using stearidonic acid-enriched soybean oil from genetically modified soybeans [J]. *Journal of Dairy Science*, 2010, 93(1): 32-37.
- [61] TOROK V A, PERCY N J, MOATE P J, et al. Influence of dietary docosahexaenoic acid supplementation on the overall rumen microbiota of dairy cows and linkages with production parameters [J]. *Canadian Journal of Microbiology*, 2014, 60(5): 267-275.

Research Progress on Effects of ω -3 Polyunsaturated Fatty Acids on Physiological Functions of Dairy Cows and Its Regulation Mechanism

HUANG Guoxin^{1,2} ZHANG Yangdong^{1,2} ZHENG Nan^{1,2} WANG Jiaqi^{1,2*}

(1. Ministry of Agriculture Laboratory of Quality & Safety Risk Assessment for Dairy Products (Beijing), Institute of Animal Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; 2. State Key Laboratory of Animal Nutrition, Institute of Animal Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

Abstract: ω -3 polyunsaturated fatty acids are essential fatty acids and play an important role in maintaining the health of dairy cows. Milk containing ω -3 polyunsaturated fatty acids is benefit of promoting human health. This article reviewed the effects of ω -3 polyunsaturated fatty acids on the reproduction performance, rumen environment and performance, and the production of milk containing ω -3 polyunsaturated fatty acids in dairy cows. [*Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2019, 31(1):32-41]

Key words: ω -3 polyunsaturated fatty acids; rumen environment; performance; reproduction; milk

* Corresponding author, professor, E-mail: jiaqi wang@vip.163.com

(责任编辑 菅景颖)