

脂类在饲料行业中的应用的新思考

杨 博^{1,2} 马永喜² 沈水宝³

(1.华南理工大学生物科学与工程学院,广州 510006;2.中国农业大学农业部饲料工业中心,北京 100193;

3.广西大学动物科技学院,南宁 530004)

摘 要: 本文从脂类的概念入手,论述了脂肪体内转化、脂肪酸平衡、 ω -3 脂肪酸、中链脂肪酸、短链脂肪酸、共轭亚油酸、结构脂、油脂氧化、仔猪对油脂的消化率、油脂净能等 10 方面的问题,指出了值得进一步研究的内容。

关键词: 脂肪酸平衡;中链脂肪酸;短链脂肪酸;结构脂

中图分类号: S816

文献标识码: A

文章编号: 1006-267X(2019)11-4901-08

脂类,也称脂质,是一类低溶于水而高溶于非极性溶剂的生物有机分子。多数脂类是脂肪酸和醇所形成的化合物及其衍生物,常规饲料分析中将其划分为粗脂肪,即可溶于石油醚或乙醚的物质的总称。而酸水解脂肪则是先用盐酸将样品水解,然后再用乙醚浸提,可以将结合态脂肪和游离态脂肪测定出来。脂类包括脂肪、类脂等,饲料行业常用的脂类包括植物油、动物脂肪和磷脂等,它们的共同点是均含脂肪酸,脂肪酸的差异是决定脂类的关键因素。

脂类在动物营养和饲料行业的传统功效包括高能值、促进脂溶性维生素吸收、抑制粉尘、改善适口性等。近年来,人们逐步认识到脂类在动物营养领域存在欠缺,尤其脂肪酸平衡、功能性脂肪酸、生物活性脂类等方面,制约了其在饲料行业的应用。本文从三大营养物质在体内代谢转化入手,探讨脂肪酸均衡和功能性脂肪酸相关理论和实践,以期引起大家对脂类营养的重新思考。

1 脂肪体内转化

养猪生产的核心其实就是将人类不愿意吃、不想吃的物品,通过生物转化器(猪),生产出来猪

肉的过程,是以耗费含碳化合物,将饲料中的以植物来源为主的蛋白质转化为食物中的动物蛋白质的过程。然而我们无法忽视的事实是,猪胴体中脂类占比远高于蛋白质(表 1)。体重超过 60 kg 以后的育肥期,机体脂肪相对于蛋白质沉积速度更快,过剩的能量主要向脂肪沉积方向转变,且随着体重增加,其蛋白质合成能力逐渐下降^[1-2]。这是猪饲料转化效率随着体重增加而不断降低的生物学基础,因此,在研究蛋白质和氨基酸的基础上,应该重视对脂肪的研究。

以肌肉沉积为代表的动物性产品生产,其本质是 ATP 驱动下的物质转化过程。猪的生产净能主要是脂肪转化,在蛋、奶等动物性产品形成过程中,脂肪也都是干物质的重要成分。动物体内脂肪主要是从淀粉和外源性脂类转化而来,即:“淀粉—糖—动物脂肪”、“饲料油脂—动物脂肪”。转化路径不同,效率不同。从降低成本和肉质改善的角度来看,可能需要重新思考动物性产品生产时的脂肪来源以及转化途径问题。显而易见,“饲料油脂—动物脂肪”具有更高的效率。饲料中合理地添加油脂,可以减少从淀粉从头开始合成动物体脂肪的比例,有助于提高动物性产品的生产效率。

收稿日期:2019-04-15

基金项目:“863”计划项目(2014AA093600);国家杰出青年科学基金项目(31725022);广东省省级科技计划项目(2017A050503001)

作者简介:杨 博(1973—),男,山东菏泽人,教授,博士,从事脂类科学研究。E-mail: 61699194@qq.com

表1 猪体主要化学成分

Table 1 Main chemical composition of pigs^[3]

%

日龄/体重 Days of age/ body weight	水分 Moisture	蛋白质 Protein		脂肪 Fat		粗灰分 Ash	
		鲜重基础 Fresh weight basis	干物质基础 DM basis	鲜重基础 Fresh weight basis	干物质基础 DM basis	鲜重基础 Fresh weight basis	干物质基础 DM basis
初生 Birth	79.95	16.25	71.40	2.45	10.76	4.06	17.84
25 日龄 25 days of age	70.67	16.56	56.40	9.74	33.17	3.06	10.42
45 kg	66.76	14.94	43.66	16.16	47.22	3.12	9.12
90 kg	53.99	14.48	31.70	28.54	62.48	2.66	5.82
114 kg	51.28	13.37	27.70	32.14	66.60	2.75	5.70
136 kg	42.48	11.63	20.65	42.64	75.70	2.06	3.66

2 脂肪酸平衡

脂肪酸是脂类物质中最主要的成分,脂肪酸的合成部位主要是肝脏和脂肪组织。脂肪酸合成的主要原料是乙酰辅酶 A、ATP 和原型烟酰胺腺嘌呤二核苷酸磷酸(NADPH)。乙酰辅酶 A 是糖、脂肪和蛋白质代谢的枢纽物质,其在线粒体生成,通过柠檬酸-丙酮酸循环出线粒体,在胞液中参与脂肪酸合成^[4]。脂肪酸从头合成需要消耗大量能量,同时释放大热量,对畜牧生产来讲,会造成大量的热增耗。而通过在饲料中添加油脂,可以减少动物体内内源性脂肪酸的合成,从而降低热能的浪费,这在生产实践中已经广泛采用。

动物体的脂肪酸组成保持相对恒定,不同动物的脂肪酸组成也具有规律性,而植物中脂肪酸组成则千差万别。动物体中(海洋水生动物除外)脂肪酸按丰度排序,通常是: C18:1 > C16:0 > C18:0 > C18:2 > 其他脂肪酸。从图 1 可见, C16:0 是动物体内源性合成的起始脂肪酸,它可以被进一步代谢成 C18:0 和 C18:1,但是, C16:0 是长链饱和脂肪酸,富含 C16:0 的油脂往往因为熔点太高而影响消化率。C18:1 则通常是动物体的第一大脂肪酸。因此,饲料中能否高效便捷地提供 C16:0 和 C18:1 就成为问题的关键,直接影响动物性产品生产的效率。但是,饲料行业在添加油脂时,大量使用的往往是大豆油。究其原因主要是大豆油供应量大、凝固点低、使用方便。然而从脂肪酸体内转化与平衡的角度思考,在饲料中大量使用大豆油则是不合理的,因为大豆油是 C18:2 为主,而 C18:2 要转化成动物性产品脂肪,需要先

分解成乙酰辅酶 A,然后再进一步代谢成 C16:0 及后续的脂肪酸,这一过程是耗能和低效的。而且当 C18:2 被分解成乙酰辅酶 A,意味着其代谢开始与糖的代谢交汇,也意味着 C18:2 发挥了和淀粉及糖相似的价值,从经济的角度也是不合理的。

在动物体最丰富的 4 种脂肪酸中, C18:2 因为饲料来源丰富,通常不构成限制。C18:1、C16:0 和 C18:0 则是需要动物大量合成的,为了更通俗地表述,我们可以称这 3 种脂肪酸为“造动物脂肪的脂肪酸”,这种脂肪酸平衡有助于提高动物的生产性能。总之,在饲料中添加动物生长所需要的平衡油脂,可以减少脂肪酸的内源性合成,有利于提高饲料转化率,通常也可以带来经济效益的提升。

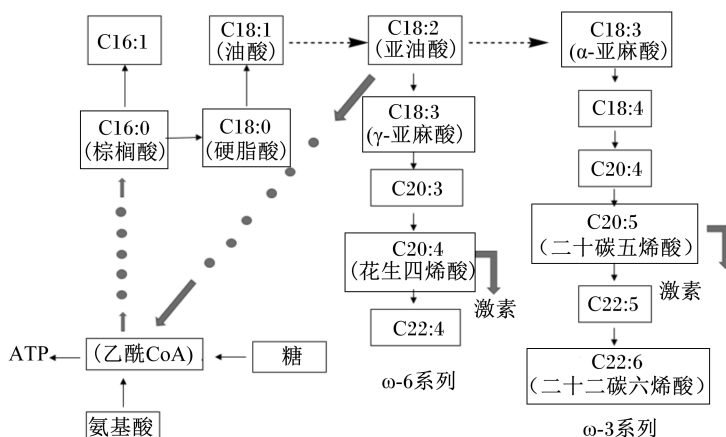
3 ω-3 脂肪酸

脂肪酸的 ω 分类法,是从脂肪酸的甲基端算起,第 3 个碳原子上开始出现双键就是 ω-3 脂肪酸,第 6 个碳原子上开始出现双键就是 ω-6 脂肪酸。动物自身不能合成多价不饱和脂肪酸,只能靠外源摄取,所以多价不饱和脂肪酸被称为必需脂肪酸。多价不饱和脂肪酸包括 ω-3 系列和 ω-6 系列。

C18:2 是 ω-6 系列的起始脂肪酸, C18:3 是 ω-3 系列的起始脂肪酸, C18:2 和 C18:3 通过碳链延长、脱饱和生成后续一系列脂肪酸。ω-6 和 ω-3 脂肪酸分别是功能不同的结构性脂质,为构成动物机体所必需。ω-6 和 ω-3 系列脂肪酸中某些成员还是激素前体物,其中 ω-6 系列脂肪酸中的花生四烯酸是合成促炎类二十烷酸类激素,如前列腺素 A₂(PGA₂)、凝血噁烷 A₂(TXA₂)、白三烯 B₄

(LTB₄)等的前体,而 ω -3脂肪酸中的二十碳五烯酸(EPA)则合成抗炎类二十烷酸类激素,如前列腺素 I₃(PGI₃)、凝血噁烷 A₃(TXA₃)和白三烯 B₅

(LTB₅)等^[7]。由于 ω -6和 ω -3系列脂肪酸的功能不同,甚至某些生理活性相反,因此二者的平衡对于动物健康非常重要。



在动物体畅通 unblocked in animal body→;在动物体内不通 blocked in animal body-----。

图1 动物体脂肪酸代谢途径

Fig.1 Animal fatty acid metabolism pathway^[5-6]

所有的自然界油脂中都含有 ω -6系列脂肪酸,但只有少数油脂含有 ω -3系列脂肪酸。所以,动物容易缺乏 ω -3系列系列脂肪酸。尽管 ω -6系列脂肪酸也被定义成必需脂肪酸,但由于C18:2往往是过剩的必需脂肪酸,甚至是有害的必需脂肪酸,因此没有现实添加意义。而在动物生产中补充 ω -3系列脂肪酸可以改善动物免疫、提高生产速度、改善生殖特性、改善毛色和光亮度、改善蛋壳外观等^[8-14]。 ω -3系列脂肪酸中,不同的脂肪酸的作用效率是不同的, ω -3系列脂肪酸中EPA才具有调节激素的活性,但是,多数动物并不能高效地实现C18:3向EPA的转化^[15]。在实践中,补充深海鱼油比补充亚麻油更有效,原因就在于鱼油中的EPA可以直接发挥激素调节作用,而亚麻油只含有C18:3^[16]。实践证明,给动物补充深海鱼油,普遍获得改善效果。行业专家也有观点认为,给母猪补充鱼粉可以改善繁殖性能,其中鱼粉中残留的EPA或二十二碳六烯酸(DHA)可能发挥了一定的作用^[17]。因此,不仅要重视饲料中 ω -6和 ω -3系列脂肪酸平衡,还要重视 ω -3系列脂肪酸作用效率,以及其最佳组合问题^[18]。

4 中链脂肪酸

中链脂肪酸是碳原子数为6~12的一系列脂

肪酸,这些脂肪酸都是饱和脂肪酸。从代谢角度,中链脂肪酸的最大特点是不需要依赖肉碱载体而直接进入线粒体氧化,具有快速供能的特点;中链脂肪酸也不会体内积累;中链脂肪酸还可以促进人体对长链脂肪酸的分解而用于减肥^[19]。中链甘油三酯(MCT)是一种以C8和C10脂肪酸为原料人工合成的一种中链脂肪酸油脂,是应用时间最久、应用领域最广的中链脂肪酸产品。在动物营养领域,MCT被用于弱小动物的快速补充能量,还被用作天然抗菌性产品^[20-22]。由于C8:0和C10:0资源的限制,MCT价格快速上涨,未来必然限制其在饲料中的应用。中链脂肪酸中C12:0(月桂酸)是来源最丰富的一种中链脂肪酸,椰子油含有40%以上的C12:0,所以,椰子油也被广泛用于饲料行业,尤其是用于母猪、仔猪养殖^[23]。

中链脂肪酸的单甘脂,尤其是C12:0的单甘脂,具有抗病毒的功能^[24]。据统计,60%的疾病都和病毒相关,很多细菌性感染也是病毒感染后的继发性感染。自然界中,抗菌性物质很多,但抗病毒的物质非常少。2009年,《Nature》报道了月桂酸单甘脂具有抗猴子免疫缺陷病毒的功能^[25],提示其可以抗人类艾滋病毒,更促进了人们对月桂酸衍生物的研发。在动物养殖领域,月桂酸单甘脂具有广谱抗病毒功能,尤其是针对蓝耳病,已有

多个以月桂酸单甘脂为主要功效成分的产品面世^[26-27]。

月桂酸单甘脂在食品行业用作乳化剂兼天然防腐剂。在饲料行业,月桂酸单甘脂可以提高油脂的消化利用率,从而可以显著提高饲料报酬。研究表明,每吨饲料添加 100~300 g 月桂酸单甘脂可以显著降低肉鸡感染球虫和细菌的几率,同时显著改善饲料转化效率和肉质^[28],显示出其在抗生素减量或者替代中的潜在应用价值,优化制造工艺、开发方便使用的剂型将会成为未来的研究方向。

5 短链脂肪酸

短链脂肪酸又称为挥发性脂肪酸(VFA),主要是乙酸、丙酸、丁酸和戊酸,VFA是反刍动物重要的能量来源,牛瘤胃一昼夜所产生的VFA可占机体所需能量的60%~70%,瘤胃内VFA含量为90~150 mmol/L。非反刍动物内源性VFA主要在结肠(猪)或者盲肠(禽)通过微生物发酵合成,短链脂肪酸是维持动物肠道健康的重要物质。

短链脂肪酸中,乙酸和丙酸吸收后运输至肝脏,主要是参与动物体的能量代谢,丁酸则主要为肠黏膜供能^[29]。肠黏膜系统具有重要的屏障功能,包括生物屏障、化学屏障、机械屏障和免疫屏障,其中免疫屏障最重要^[30]。肠黏膜营养是近年来研究的热点,研究发现肠黏膜的主要能量物质不是葡萄糖,而是以谷氨酸、谷氨酰胺为代表的氨基酸,或者是以丁酸为代表的短链脂肪酸。当能量不足时,就会发生肠黏膜萎缩和绒毛高度下降,甚至造成肠绒毛的坏死脱落^[31-33]。为动物补充短链脂肪酸,可以缓解由于谷氨酰胺供应不足造成的肠黏膜能量不足问题,且具有良好的经济性。

丁酸具有选择性抑菌的特点,对乳酸菌等抑制作用小,而对有害菌的抑制作用强,从而发挥调节肠道菌群的功能,对控制肠道感染具有显著功效^[34]。丁酸还具有促进消化液分泌、增加消化器官的血流量等功能^[17]。

为肠道补充丁酸制剂的重要性在行业已经被广泛接受。丁酸补充物质主要有丁酸钠和丁酸甘油酯。由于丁酸钠难以为后肠提供丁酸、臭味大等缺点,人们开发了包被丁酸钠,但包被丁酸钠含量低,添加成本高。丁酸甘油酯是一种脂类分子,其可以过胃,并在全肠道缓释丁酸,且解决了丁酸

钠臭味问题,是一种更有发展前景的肠道丁酸补充剂。

实践表明,将丁酸甘油酯和月桂酸单甘脂复合使用,具有协调效应^[35]。在后抗生素时代,中短链脂肪酸类产品以其明确的机理、可靠的效果将会发挥重要的作用。

6 共轭亚油酸

共轭亚油酸(CLA)是一类天然存在的、分子内含有共轭双键的十八碳二烯酸,是亚油酸具有不同位置和空间构型的异构体的统称,CLA包含了多种异构体,其中含量最多、运用最广泛的2种异构体为*c9, t11*-CLA和*t10, c12*-CLA。自首次从烤牛排中分离出CLA并发现它们的抗癌活性以来,对CLA的研究一直较为活跃^[36-37]。CLA具有抗癌、抗氧化、降低血清胆固醇、抑制脂肪积累、促进生长、刺激免疫等作用^[38-42]。在动物养殖方面,CLA具有以下潜在应用价值:1)生产富含CLA的肉蛋奶产品;2)抑制脂肪积累,用于特种养殖;3)免疫调节功能。

关于CLA的报道非常多,但CLA要成为具有经济性的饲料添加剂,还要解决一系列问题。首先通过优化生产途径和工艺,以进一步降低生产成本;其次是产品酯化形式。目前的CLA产品是游离酸或者乙酯型,酸型产品的缺点是容易氧化,乙酯型产品的缺点是生物利用率低,只有将CLA转化甘油酯,才可以将其功能充分发挥出来。

7 结构脂

甘油三酯是自然界中的最主要脂类,也是油脂的主要成分。甘油三酯分子结构是由1个甘油骨架连接3分子脂肪酸构成。由于甘油骨架包含手性碳原子,3个脂肪酸酰化位置(立体专一编号, stereo specific number, sn)分别被定义为sn-1、sn-2和sn-3。自然界中脂肪酸按照不同的排列组合和甘油结合,造就了千差万别的甘油三酯分子,形成的丰富多彩的脂质产品。

结构脂,又称重构脂或质构脂,是通过人为的方法改变甘油骨架上脂肪酸酰基的组成和排列所得到的一类新型油脂。结构脂具有独特的营养价值和生理功能,是未来脂质产品家族的重要成员^[43]。

根据不同动物不同阶段消化吸收的特点,可

以设计不同的结构脂。例如:猪乳脂结构代表性结构为 OPO 结构,O 代表油酸(C18:1),P 代表棕榈酸(C16:0)^[44]。OPO 在胰脂肪酶分解下,高熔点的 C16:0 不会游离出来,从而避免其与钙、镁、锌等离子形成难以利用的皂盐^[45]。和 OPO 结构相反,一般的植物油中 C16:0 是位于 1、3 位,可见,并不适合在仔猪饲料中大量使用植物油。

丁酸甘油酯具有苦味,影响其在教保料中的使用,而通过在丁酸甘油酯分子上掺入长链脂肪酸,则可以大大改善苦味,减少其对适口性的影响。

结构脂的生产有多种技术,低成本产品可以基于酯交换、分提等技术获得结构优化的油脂。高端的结构脂是基于高特异性脂肪酶的催化,在非水相条件下定向反应获得。

8 油脂氧化问题

饲料中添加油脂带来多种优势的同时,带来的氧化风险也不容忽视。油脂氧化不仅造成养分损失,降低饲料适口性,还会产生有毒有害物质,如氢过氧化物、醛类、环氧化物、二聚物、反式脂肪酸等,这些物质会损伤动物的消化器官,降低免疫力。其中有关丙二醛(MDA)、4-羟基壬烯醛(HNE)的毒性研究最广泛^[46]。除此之外,还会影响肉品质,脂肪氧化会影响肉的色泽、货架寿命,甚至会出现黄膘肉^[47]。

油脂的氧化机制有自动氧化、光敏氧化和酶促氧化 3 种,其中自动氧化最普遍。油脂的自动氧化是个链式反应,只要有氧气存在,油脂的自动氧化就会自动启动、自动传递并且自动加速^[48]。饲料行业为避免油脂的氧化风险,应该注意以下问题:1) 尽量避免饲料微量元素(铁、铜、锌等)和油脂的充分接触,因为这些金属离子可以强烈地激发油脂自动氧化反应;2) 含膨化大豆的饲料应注意保质期,因为大豆中存在高活性的脂肪氧合酶(LoX),即使是在膨化大豆中仍然残留较高的酶活;3) 关注含高活性脂肪酶的饲料原料,如米糠,即使是膨化米糠,仍然还有 5% 左右的脂肪酶活性,因此含米糠的饲料产品要加快流通速度;4) 高不饱和脂肪酸的原料,如鱼油、亚麻油,这些油脂的氧化诱导期通常只有植物油的 1/10 左右,甚至更短,在操作时,更应该注意原料的选择和抗氧化处理;5) 陈化粮使用前要做油脂质量评定;6) 在

油脂和鱼粉等产品中添加抗氧化剂。

9 仔猪对油脂的消化率

为了缓解断奶仔猪采食量低、能量摄入不足,通常的解决方案是添加油脂,但是仔猪对饲料中脂肪的消化率较低。猪母乳干物质中脂肪含量在 40% 左右,而仔猪却可以轻松消化母乳。究其原因可能是:1) 猪母乳脂肪为 OPO 结构;2) 母乳脂肪处于良好的乳化状态,脂肪以脂蛋白等复合形式存在;3) 母乳组成相对简单,受其他饲料原料干扰少;4) 母乳以流体形式供应,其干物质含量与固体饲料存在显著差异。

将所有油脂改造成 OPO 在经济上是不可行的,折中的方案是改善油脂的乳化。油脂的消化就是在胰脂肪酶作用下分解成脂肪酸和甘油一酯的过程。胰脂肪酶具有典型的界面活化现象,具有盖子结构,当处于油水界面时,盖子打开,从而使得酶成为有活性状态。所以,界面面积大小是油脂消化难易的关键。动物消化油脂时,通过胆汁酸乳化油脂,但通常胆汁酸不足以充分乳化油脂,这时就需要添加外源性乳化剂以帮助油脂消化。可以用于饲料中的脂肪乳化剂,包括磷脂型、胆汁酸型、糖酯型、甘油酯型等。为更进一步改善油脂的消化率,可以考虑对油脂进行体外预乳化或者预消化,操作起来更复杂,只适合于某些特定场景。

10 油脂净能

净能是饲料总能扣除粪能、尿能、气体能和热增耗等损失后,实际可用于维持和生产的能量。与消化能或代谢能体系相比,净能体系考虑了饲料在动物体内能量利用过程中所造成的全部损失和不同养分代谢能利用效率的差异,即消化能和代谢能体系高估粗蛋白质和纤维的能量水平,低估脂肪和淀粉的能量水平。因此,净能可独立于饲料的化学组分,并能使饲料能值与动物能量需要量相统一^[49]。

饲料行业应用较多的净能预测方程是 1994 年发表的 11 个方程中的 1~2 个^[50],NRC(2012) 营养成分表采用的就是其中 2 个方程的平均值。直接测定净能的前提是精准呼吸商,而且硬件设备投入高,实际操作的难度较大。目前,中国农业大学已经测定了我国代表性饲料原料的净能^[51]。

由图 2 可见,对于育肥猪,饲料中的总能只有 30%多是生产净能。热增耗占据了代谢能的相当大比重,热增耗可以用于维持体温。因此,如何减少热增耗、提高生产净能是提高饲料转化效率报酬的关键。油脂具有高净能的特点,对脂肪酸进行平衡是否可以使净能进一步提高值得研究。从理论上讲,脂肪酸平衡不仅可以降低热增耗,还可以提高动物体脂肪的转化速度,从而节约维持净能。有必要对不同的油脂配方、不同的油脂结构进行更准确的净能测定和建立预测方程,将精准营养和饲料配方推进到一个新的高度。

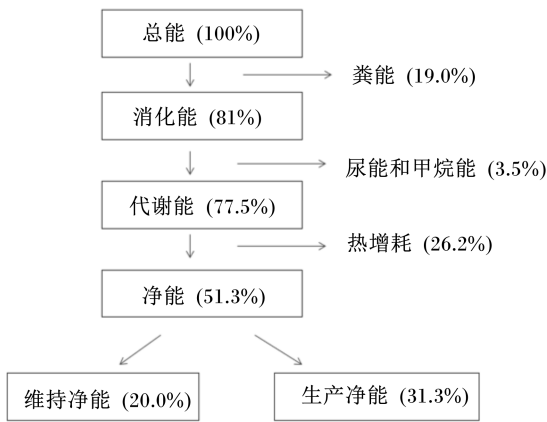


图 2 生长育肥猪饲料能量利用图

Fig.2 Dietary energy utilization map of growing and finishing pigs^[51]

11 展望

无论是从体内能量代谢与转化角度还是畜产品形成角度,都值得对其进行系统研究。在饲料行业禁止抗生素促生长剂的大背景下,全面评价脂肪酸平衡以及功能性脂肪酸对基础营养、畜产品品质和畜禽免疫力提升方面的价值,合理地开发和利用脂类,尤其是功能性脂肪酸类产品,具有重要的理论和现实意义。

参考文献:

[1] DAVIS T A, BURRIN D G, FIOROTTO M L, et al. Protein synthesis in skeletal muscle and jejunum is more responsive to feeding in 7-than in 26-day-old pigs [J]. The American Journal of Physiology, 1996, 270: E802-E809.

[2] ROSSELL J B, PRITCHARD J L R. Analysis of oil-

seeds, fats, and fatty foods [M]. New York: Elsevier, 1991: 329-394.

- [3] 陈代文,王恬.动物营养与饲养学 [M].北京:中国农业出版社,2011:20.
- [4] 查锡良,药立波.生物化学与分子生物学 [M].8 版.北京:人民卫生出版社,2013:142-173.
- [5] YU M, BENHAM A, LOGAN S, et al. ELOVL4 protein preferentially elongates 20:5n3 to very long chain PUFAs over 20:4n6 and 22:6n3 [J]. Journal of Lipid Research, 2012, 53 (3): 494-504.
- [6] LEE J E, LEE H, KANG S, et al. Fatty acid desaturases, polyunsaturated fatty acid regulation, and biotechnological advances [J]. Nutrients, 2016, 8 (1): 23.
- [7] NICOLAOU A, KOKOTOS G. Bioactive lipids [M]. UK: The Oily Press, 2012: 17-19.
- [8] KHATIBJOO A, KERMANSHAHI H, GOLIAN A, et al. The effect of n-6/n-3 fatty acid ratios on broiler breeder performance, hatchability, fatty acid profile and reproduction [J]. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition, 2018, 102 (4): 986-998.
- [9] HUBER L A, HOODA S, FISHER-HEFFERNAN R E, et al. Effect of reducing the ratio of omega-6-to-omega-3 fatty acids in diets of low protein quality on nursery pig growth performance and immune response [J]. Journal of Animal Science, 2018, 96 (10): 4348-4359.
- [10] GOKULDAS P P, SINGH S K, TAMULI M K, et al. Dietary supplementation of n-3 polyunsaturated fatty acid alters endometrial expression of genes involved in prostaglandin biosynthetic pathway in breeding sows (*Sus scrofa*) [J]. Theriogenology, 2018, 110: 201-208.
- [11] YIN J, LEE K Y, KIM J K, et al. Effects of different n-6 to n-3 polyunsaturated fatty acids ratio on reproductive performance, fecal microbiota and nutrient digestibility of gestation-lactating sows and suckling piglets [J]. Animal Science Journal, 2017, 88 (11): 1744-1752.
- [12] MURPHY E M, STANTON C, BRIEN C O, et al. The effect of dietary supplementation of algae rich in docosahexaenoic acid on boar fertility [J]. Theriogenology, 2017, 90: 78-87.
- [13] SAFARI ASL R, SHARIATMADARI F, SHARAFI M, et al. Improvements in semen quality, sperm fatty acids, and reproductive performance in aged Ross breeder roosters fed a diet supplemented with a moderate ratio of n-3:n-6 fatty acids [J]. Poultry Science,

- 2018, 97(11):4113-4121.
- [14] DONG X F, LIU S, TONG J M. Comparative effect of dietary soybean oil, fish oil, and coconut oil on performance, egg quality and some blood parameters in laying hens[J]. *Poultry Science*, 2018, 97(7):2460-2472.
- [15] 潘勇. α -亚麻酸在体内外的吸收和转化为长链多不饱和脂肪酸效率的研究[D]. 硕士学位论文. 无锡: 江南大学, 2016.
- [16] 冷静, 汪巩. 鱼油中的多不饱和 ω -3 脂肪酸对人体健康的作用[J]. *中国油脂*, 1992(增刊):250-257.
- [17] 肖成林. 日粮中不同水平的鱼油对母猪繁殖性能及乳成分的影响[D]. 硕士学位论文. 武汉: 华中农业大学, 2007.
- [18] WIJENDRAN V, HAYES K C. Dietary n-6 and n-3 fatty acid balance and cardiovascular health[J]. *Annual Review of Nutrition*, 2004, 24:597-615.
- [19] PAPAMANDJARIS A A, MACDOUGALL D E, JONES P J H. Medium chain fatty acid metabolism and energy expenditure; obesity treatment implications[J]. *Life Sciences*, 1998, 62(14):1203-1215.
- [20] DICKLIN M E, ROBINSON J L, LIN X, et al. Ontogeny and chain-length specificity of gastrointestinal lipases affect medium-chain triacylglycerol utilization by newborn pigs[J]. *Journal of Animal Science*, 2006, 84(4):818-825.
- [21] ZENITEK J, BUCHHEIT-RENKO S, FERRARA F, et al. Nutritional and physiological role of medium-chain triglycerides and medium-chain fatty acids in piglets[J]. *Animal Health Research Reviews*, 2011, 12(1):83-93.
- [22] YEN H C, LAI W K, LIN C S, et al. Medium-chain triglyceride as an alternative of in-feed colistin sulfate to improve growth performance and intestinal microbial environment in newly weaned pigs[J]. *Animal Science Journal*, 2015, 86(1):99-104.
- [23] 刘元述, 戴德渊. 椰子油在猪日粮中的应用探讨[J]. *饲料工业*, 2010, 31(13):50-52.
- [24] INTAHPHUAK S, KHONSUNG P, PANTHONG A. Anti-inflammatory, analgesic, and antipyretic activities of virgin coconut oil[J]. *Pharmaceutical Biology*, 2010, 48(2):151-157.
- [25] LI Q S, ESTES J D, SCHLIEVERT P M, et al. Glycerol monolaurate prevents mucosal SIV transmission[J]. *Nature*, 2009, 458(7241):1034-1038.
- [26] 蒋增良, 杨明, 杜鹃, 等. 月桂酸单甘油酯抑菌抗病毒特性及其在食品中的应用[J]. *中国粮油学报*, 2015, 30(2):142-146.
- [27] 张西奎. α -单月桂酸甘油酯对蓝耳病病毒防控临床实证[J]. *今日养猪业*, 2017(4):103-105.
- [28] FORTUOSO B F, DOS REIS J H, GEBERT R R, et al. Glycerol monolaurate in the diet of broiler chickens replacing conventional antimicrobials: impact on health, performance and meat quality[J]. *Microbial Pathogenesis*, 2019, 129:161-167.
- [29] 赵怀宝, 任玉龙. 短链脂肪酸在动物体内的生理特点和功能[J]. *饲料研究*, 2016(3):29-32.
- [30] BROOM L J. Gut barrier function: effects of (antibiotic) growth promoters on key barrier components and associations with growth performance[J]. *Poultry Science*, 2018, 97(5):1572-1578.
- [31] TOMÉ D. The roles of dietary glutamate in the intestine[J]. *Annals of Nutrition & Metabolism*, 2018, 73(Suppl.5):15-20.
- [32] BLACHIER F, BOUTRY C, BOS C, et al. Metabolism and functions of L-glutamate in the epithelial cells of the small and large intestines[J]. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 2009, 90(3):814S-821S.
- [33] THIBAUT R, BLACHIER F, DARCY-VRILLON B, et al. Butyrate utilization by the colonic mucosa in inflammatory bowel diseases: a transport deficiency[J]. *Inflammatory Bowel Diseases*, 2010, 16(4):684-695.
- [34] DE LANGE C F M, PLUSKE J, GONG J, et al. Strategic use of feed ingredients and feed additives to stimulate gut health and development in young pigs[J]. *Livestock Science*, 2010, 134(1/2/3):124-134.
- [35] 甘利平, 李追, 郭双双, 等. 饲喂复合脂肪酸酯及粪肠球菌对改善肉鸡早期肠道健康的影响[J]. *饲料研究*, 2016(23):1-8.
- [36] BRUEN R, FITZSIMONS S, BELTON O. Atheroprotective effects of conjugated linoleic acid[J]. *British Journal of Clinical Pharmacology*, 2017, 83(1):46-53.
- [37] YANG B, GAO H, STANTON C, et al. Bacterial conjugated linoleic acid production and their applications[J]. *Progress in Lipid Research*, 2017, 68:26-36.
- [38] NAMAZI N, IRANDOOST P, LARIJANI B, et al. The effects of supplementation with conjugated linoleic acid on anthropometric indices and body composition in overweight and obese subjects: a systematic review and meta-analysis[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2019: 1-14, doi: 10.1080/10408393.2018.1466107.

- [39] MOHAMMADI-SARTANG M, SOHRABI Z, ES-MAEILINEZHAD Z, et al. Effect of conjugated linoleic acid on leptin level: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials [J]. *Hormone and Metabolic Research*, 2018, 50(2): 106–116.
- [40] PALMQUIST D L, JENKINS T C. A 100-year review: fat feeding of dairy cows [J]. *Journal of Dairy Science*, 2017, 100(12): 10061–10077.
- [41] KIM J H, KIM Y, KIM Y J, et al. Conjugated linoleic acid: potential health benefits as a functional food ingredient [J]. *Annual Review of Food Science and Technology*, 2016, 7: 221–244.
- [42] SHOKRYAZDAN P, RAJION M A, MENG G Y, et al. Conjugated linoleic acid: a potent fatty acid linked to animal and human health [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2017, 57(13): 2737–2748.
- [43] OSBORN H T, AKOH C C. Structured lipids-novel fats with medical, nutraceutical, and food applications [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2002, 1(3): 110–120.
- [44] 吕艳涛. 母猪乳脂合成关键基因筛选及长链脂肪酸对乳脂合成的调控研究 [D]. 博士学位论文. 广州: 华南农业大学, 2016.
- [45] 宋秋. OPO 结构脂肪的营养价值评定 [D]. 硕士学位论文. 哈尔滨: 东北农业大学, 2012.
- [46] 曹文明, 薛斌, 袁超, 等. 油脂氧化酸败研究进展 [J]. *粮食与油脂*, 2013, 26(3): 1–5.
- [47] 孙得发. 2016—2017 年中国饲料企业使用陈化玉米导致的黄膘肉问题及思考 [J]. *中国畜牧杂志*, 2017, 53(7): 147–151, 166.
- [48] 张明成. 油脂氧化机理及抗氧化措施的介绍 [J]. *农业机械*, 2011(8): 49–52.
- [49] 刘德稳. 生长猪常用七种饲料原料净能预测方程 [D]. 博士学位论文. 北京: 中国农业大学, 2014.
- [50] NOBLET J, FORTUNE H, SHI X S, et al. Prediction of net energy value of feeds for growing pigs [J]. *Journal of Animal Science*, 1994, 72(2): 344–354.
- [51] 李德发, 张瑞霜. 中国猪饲料原料净能体系的研究进展 [J]. *饲料与畜牧*, 2016(12): 24–27.

Rethinking of Using Lipids in Feed Industry

YANG Bo^{1,2} MA Yongxi² SHEN Shuibao³

(1. School of Biology and Biological Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Ministry of Agriculture Feed Industry Centre, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 3. College of Animal Science and Technology, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Starting from the term of lipid, this paper addresses metabolism and transform of lipid in animal, balance of fatty acids, ω -3 fatty acids, medium-chain and short-chain fatty acids, conjugated linoleic acid, structured lipids, oxidation of lipid, lower digestibility of piglets to lipids and net energy system for using lipid in feed industry, and points out areas worth further research. [*Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2019, 31(11): 4901-4908]

Key words: fatty acids balance; medium-chain fatty acids; short-chain fatty acids; structured lipids