

# 畜禽动物油甘油二酯的酶法制备及应用研究进展

祝超智<sup>1</sup>, 郭旗<sup>1</sup>, 赵泽鑫<sup>2</sup>, 王卫飞<sup>3</sup>, 崔文明<sup>1</sup>, 许龙<sup>1,\*</sup>, 赵改名<sup>1,\*</sup>, 李航<sup>4</sup>  
(1.河南农业大学食品科学技术学院, 河南 郑州 450002; 2.湖北工业大学发酵工程教育部重点实验室, 湖北 武汉 430068; 3.广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所, 广东 广州 510610; 4.河南恒都食品有限公司, 河南 泌阳 463700)

**摘要:** 1,3-甘油二酯 (diacylglycerol, DAG) 是公认的安全食品, 在人体中的代谢途径不同于甘油三酯, 具有提高人体新陈代谢水平以及预防肥胖和心血管疾病等功效。然而, 天然DAG在食用油中的质量分数不及10%, 因此, 近年来高纯度DAG的制备受到了广泛关注。与化学法相比, 酶法因绿色、安全、选择性高等优点成为了油脂工业制备DAG的首选。畜禽动物油具有特殊的风味和一定的营养价值, 但其高饱和脂肪、高胆固醇和高熔点等理化特征致使其在食品工业的利用受到了极大限制。鉴于此, 合成畜禽动物油DAG成为了实现畜禽动物油高值化利用的一种有效途径。本文综述了酶法制备畜禽动物油DAG的研究现状及其潜在的应用价值, 以为畜禽动物油DAG的酶法加工及高值化利用提供一定的思路。

**关键词:** 畜禽动物油; 酶法改性; 甘油三酯; 甘油二酯; 脂肪酶

## Research Progress on Enzymatic Production and Application of Diacylglycerol from Livestock and Poultry Fats

ZHU Chaozhi<sup>1</sup>, GUO Qi<sup>1</sup>, ZHAO Zexin<sup>2</sup>, WANG Weifei<sup>3</sup>, CUI Wenming<sup>1</sup>, XU Long<sup>1,\*</sup>, ZHAO Gaiming<sup>1,\*</sup>, LI Hang<sup>4</sup>  
(1. College of Food Science and Technology, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China;

2. Key Laboratory of Fermentation Engineering (Ministry of Education), Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;  
3. Sericulture & Agri-food Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510610, China;  
4. Henan Hengdu Food Co. Ltd., Biyang 463700, China)

**Abstract:** 1,3-Diacylglycerol (DAG) has been well recognized as a safe food component. The metabolic pathway of DAG in the body is different from that of triacylglycerol, and DAG has been demonstrated to contribute to improving metabolism and preventing obesity and cardiovascular diseases. However, the mass fraction of natural DAG in edible oils and fats is less than 10%, so the preparation of high-purity DAG has received widespread attention in recent years. Enzymatic synthesis is the method of choice for the industrial preparation of DAG due to the advantages of eco-friendliness, safety and desirable selectivity over chemical synthesis. Edible livestock and poultry fats, as by-products of slaughter and processing, have a special flavor and nutritional value. However, their undesirable physicochemical properties, especially high melting points and high levels of saturated fatty acids and cholesterols, highly limit their applications in the food industry. In light of this, the synthesis of DAG from edible livestock and poultry fats is a promising approach for their high-value utilization. The current status of the enzymatic synthesis and the potential application of DAG from livestock and poultry fats are reviewed in this article. It is anticipated that this review will provide new ideas for researchers interested in the enzymatic preparation and high-value utilization of DAG from livestock and poultry fats.

**Keywords:** livestock and poultry fats; enzymatic modification; triacylglycerol; diacylglycerol; lipase

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230115-120

中图分类号: TS209

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2024) 03-0266-09

收稿日期: 2023-01-15

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项 (CARS-37); 河南农业大学青年英才基金项目 (30501048)

第一作者简介: 祝超智 (1985—) (ORCID: 0000-0002-4582-747X), 女, 讲师, 博士, 研究方向为肉类加工与质量控制。

E-mail: zhuchaozhi66@163.com

\*通信作者简介: 许龙 (1989—) (ORCID: 0000-0002-3050-8214), 男, 讲师, 博士, 研究方向为脂质营养与代谢。

E-mail: longxu@henau.edu.cn

赵改名 (1965—) (ORCID: 0000-0002-4538-3186), 男, 教授, 博士, 研究方向为肉类加工与产品质量安全控制体系。E-mail: gmzhao@126.com

引文格式:

祝超智, 郭旗, 赵泽鑫, 等. 畜禽动物油甘油二酯的酶法制备及应用研究进展[J]. 食品科学, 2024, 45(3): 266-274.

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230115-120. <http://www.spkx.net.cn>

ZHU Chaozhi, GUO Qi, ZHAO Zexin, et al. Research progress on enzymatic production and application of diacylglycerol from livestock and poultry fats[J]. Food Science, 2024, 45(3): 266-274. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230115-120. <http://www.spkx.net.cn>

与植物油相比, 动物油有着特殊的香味, 有助于增进消费者的食欲、促进脂溶性维生素的吸收, 特别是牛油, 因其口感良好、香味宜人, 已经成为了川渝麻辣火锅的核心主料。自改革开放以来, 我国肉类工业飞速发展, 肉制品市场规模显著扩大, 取得了举世瞩目的成就。如今, 我国已成为世界上肉类年产量最大的国家<sup>[1]</sup>, 2021年我国畜禽肉合计总量为9 645万 t, 在新冠疫情阶段, 我国的肉制品产业仍然保持着强有力的发展势头<sup>[2]</sup>。作为畜禽肉制品加工的副产物, 畜禽动物油脂的年产量巨大, 2021年全国牛油的年产量约135~180万 t, 猪油约240万 t。

畜禽动物油脂中的饱和脂肪酸质量分数(牛脂约含54%, 猪脂约含42%, 羊脂约含54%, 精炼鹅油约含33%, 鸡油约含34.4%)和胆固醇含量(牛脂约含1.53 mg/g, 猪脂约含1.10 mg/g, 羊脂约含1.10 mg/g)较高, 大量研究发现, 人体摄入含饱和脂肪酸以及胆固醇高的动物油后, 高血脂、高血压及其他慢性心血管疾病的患病率显著上升<sup>[3]</sup>。这些关于动物油的营养健康问题被报道后, 动物油脂在食品工业的应用受到了极大限制, 大量高品质的畜禽动物油脂只能用做饲料原料, 甚至被当作废料遗弃。如何实现畜禽动物油脂的高值化、合理化利用, 成为食品工业中亟待解决的关键问题之一。

功能性结构脂质的合成一直以来被视为油脂行业发展重要方向, 1,3-甘油二酯(diacylglycerol, DAG)<sup>[4]</sup>、LML型结构酯<sup>[5]</sup>、二十碳五烯酸/二十二碳六烯酸富集型甘油三酯(triacylglycerol, TAG)<sup>[6]</sup>和OPO型结构脂<sup>[7]</sup>等结构脂产品已经实现工业化生产。与化学催化工艺相比, 酶法制备具有反应条件温和、专一性强、无毒副产物生成等优势, 更能迎合绿色工业的需求<sup>[8]</sup>。结构脂DAG具有减少内脏脂肪、抑制体质量增加和降低血脂<sup>[9]</sup>等显著的营养保健功能, 已经被美国食品药品监督管理局、日本医师协会和我国国家卫生健康委员会批准为安全食品。近年来关于酶法改性制备DAG的研究大量涌现<sup>[10]</sup>, 其中南理工南理大学酶法制备甘油二酯项目率先完成工业化, 甘油二酯系列产品已上市流通。借鉴植物油的酶法改性途径, 生产功能性的动物油DAG, 是实现动物油高值化利用的一种有效手段。本文综述了畜禽动物油DAG的酶法制备及应用研究进展, 旨在为动物油脂的合理化利用提供一定的理论支撑和技术参考。

## 1 畜禽动物油的理化特性、营养功能及加工利用现状

### 1.1 畜禽动物油的理化特性

可食用畜禽动物油, 指的是健康的可食用畜禽经屠宰后, 从其卫生安全的脂肪组织经一系列较为成熟的现代化工艺精炼制得的油脂, 如牛脂、羊脂、猪脂和鸡油等。精炼动物油色泽洁白或黄白, 质地均匀细腻, 香味浓郁醇厚。与植物油的甘油酯组成类似, 畜禽动物油的主要成分也是TAG, 脂肪酸组成主要为饱和脂肪酸(saturated fatty acid, SFA)(例如棕榈酸、硬脂酸)、单不饱和脂肪酸(monounsaturated fatty acid, MUFA)(例如油酸)及少量多不饱和脂肪酸(polyunsaturated fatty acid, PUFA)(例如亚油酸、亚麻酸)(表1)<sup>[11-13]</sup>。因动物油含有大量的SFA, 导致其熔点较高(20~50 ℃)(表2), 常温下为固体, 有着良好的稳定性。动物油还含有大量植物油所不具备的香味成分, 如羰基类、醇类、醚类、醛类、酮类、羧酸类、胺类、呋喃类等风味物质, 这种特殊的香味可以有效增进食欲。此外, 相较于植物油的精炼或加工而言, 动物油的氢化及精炼脱臭过程不易产生反式脂肪和3-氯-1,2-丙二醇脂肪酸酯等有害因子<sup>[14]</sup>。

表1 一般市售动物油脂脂肪酸组成及质量分数

Table 1 Composition and content of fatty acids in common commercial livestock and poultry fats %

脂肪酸	牛脂 <sup>[15-17]</sup>	羊脂 <sup>[15-17]</sup>	猪脂 <sup>[15-17]</sup>	驴脂 <sup>[15,28-29]</sup>	鸡油 <sup>[14,16-17,21,30-32]</sup>	鸭油 <sup>[14,16-17,33-36]</sup>	鸵鸟油 <sup>[11,37-41]</sup>
月桂酸C <sub>12:0</sub>	0.05~0.07	0.21~0.32	0.00~0.09	0.10~0.16	0.02~0.10	0.10~2.38	0.03~0.27
豆蔻酸C <sub>14:0</sub>	2.93~2.93	3.32~3.78	0.22~3.98	1.48~3.28	0.44~1.06	0.01~0.69	0.40~1.41
棕榈酸C <sub>16:0</sub>	19.09~25.53	20.06~25.13	20.13~32.00	17.5~36.95	19.01~33.46	18.15~25.87	17.50~36.95
棕榈油酸C <sub>16:1</sub>	0.62~4.49	2.05~2.99	1.29~5.00	5.32	3.45~8.74	3.07~20.11	0.32~12.45
十七烷酸C <sub>17:0</sub>	1.32~4.38	1.79~2.04	0.18~0.64	—	0.06~0.41	0.14~1.98	0.15~0.45
十七碳一烯酸C <sub>17:1</sub>	0.46	0.80~2.14	0.09~0.17	—	0.05~0.16	0.11	—
硬脂酸C <sub>18:0</sub>	21.38~40.90	13.17~38.17	12.00~19.80	5.60~5.76	4.72~12.89	3.97~12.33	5.61~12.80
油酸C <sub>18:1</sub>	22.15~38.36	24.37~45.74	31.58~45.00	36.28	29.18~45.59	24.82~39.43	27.65~45.70
亚油酸C <sub>18:2</sub>	1.55~3.20	1.57~2.34	3.00~17.53	12.00	10.22~21.19	12.11~24.65	7.34~27.70
亚麻酸C <sub>18:3</sub>	0.10~0.30	0.32~2.36	0.00~0.82	4.56	0.18~0.53	0.45~1.54	0.81~3.20
花生酸C <sub>20:0</sub>	0.17~0.46	0.10	0.16~0.32	0.08~0.17	0.33~0.47	0.10~0.62	0.05~1.21
花生一烯酸C <sub>20:1</sub>	0.10~0.48	0.03~0.06	0.50~2.35	0.89	0.20~1.64	0.02~0.52	0.31~0.90
花生二烯酸C <sub>20:2</sub>	0.00	0.01	0.30~0.58	0.60	0.13~0.63	0.05~0.15	—
花生三烯酸C <sub>20:3</sub>	0.03	0.02	0.17~0.18	0.14	0.55	0.06~0.15	—
花生四烯酸C <sub>20:4</sub>	0.02~0.03	0.06	0.10~0.21	0.06	3.86	0.27~0.37	0.04~0.30
山萘酸C <sub>22:0</sub>	0.02~0.07	0.01	0.01	0.25	0.16	0.13~0.35	—
芥酸C <sub>22:1</sub>	0.00~3.12	0~2.12	0.01~1.35	0.02~0.07	0.49	0.04~0.11	—
ΣSFA	47.80~71.60	44.89~55.82	36.00~61.89	27.76~38.37	32.00~36.83	18.50~49.00	40.09~55.93
ΣMUFA	33.22~43.00	34.56~48.96	33.51~48.00	41.92~42.74	38.22~70.24	40.70~70.33	50.80~65.19
ΣPUFA	1.60~5.00	3.20~12.00	8.02~16.75	16.56~24.43	10.00~30.90	19.60~22.10	8.20~20.07

注: 一文献未提及。表3同。

表2 常见畜禽动物油脂的理化指标及主要用途

Table 2 Physicochemical indices and applications of common livestock and poultry fats

动物油	酸价/(mg/g)	熔点/℃	碘值/(mg I/g)	皂化值/(mg/g)	色泽	风味	用途	参考文献
牛脂	0.71~1.20	38.0~50.0	36.0~52.4	182.0~195.5	淡黄	味浓芳香	制备代可可脂、糖果、人造奶油、液体牛脂作为深度煎炸的起酥油	[15,17,45-46]
羊脂	0.63~2.20	40.0~49.0	32.4~48.8	188.0~202.5	洁白,有光泽	特殊膻味,鲜香	制备甘油单酯(monoglyceride, MAG)和DAG、脂肪酸钙、肥皂、生物柴油	[15-17]
猪脂	0.21~1.23	28.0~48.0	46.0~78.0	192.0~200.5	洁白或微黄	浓郁醇香	作为烹饪煎炸油、起酥油,制备人造奶油、单硬脂酸甘油酯、甘油、硬脂酸等	[15,17,25-27]
驴脂	0.37~0.58	39.0~40.0	85.0~86.0	193.0~201.5	白色、淡黄色或黄色,半透明	味甘,平和,无特殊气味	制备保健食品、中药材、化妆品	[15,17,29,47]
鸡油	0.09~1.55	26.3	67.5~78.2	194.0	浅黄,透亮	醇香,鲜美,润滑	作为起酥油,制备宠物食品、肥皂、生物柴油	[14,16-17,30-32,48-49]
鸭油	0.10~2.47	19~30	68.0~79.0	195.0~210.5	淡黄,透亮	醇香,有特殊腥味	作为饲料添加用油、化工用油	[14,16,33-34,36]
鸵鸟油	0.64~2.48	34.7	72.2~77.3	193.0~232.0	浅黄色液态或乳白色膏状	无味	作为食用油,制备保健食品、中药材、化妆品、动物饲料	[11,37-44]

### 1.2 畜禽动物油的营养功能

自20世纪50年代起,相继有研究指出,食用饱和脂肪和胆固醇含量高的动物油脂具有诱发心脑血管疾病和癌症等疾病的潜在风险<sup>[50-51]</sup>,因此,不饱和脂肪酸含量高的植物油成为了消费者烹调用油的首选。然而,近些年来,最新研究表明,适量地摄入动物油脂并不会给人体健康产生威胁<sup>[52]</sup>,搭配食用植物油和动物油比仅食用植物油有着更好的营养效果。通常,脂肪的摄入应占总能量摄入的30%,其中10%的脂肪应来源于饱和脂肪<sup>[53]</sup>。其次,控制促炎因子 $n-6$  PUFA与抗炎因子 $n-3$  PUFA的比例对于促进健康具有重要意义,高比例的 $n-6/n-3$  PUFA被认为是癌症和冠心病的潜在风险因素<sup>[54]</sup>。关于 $n-6/n-3$  PUFA的最佳推荐值,国际上尚无统一标准,但基本都控制在4:1左右。通常情况下,动物油的 $n-6/n-3$  PUFA比值显著低于植物油,基于此,动物油可能在促进人体健康方面发挥着重要作用。第三,畜禽动物油最大的益处在于其可以为机体提供必需的脂溶性维生素(例如VA、VD、VE、VK),而这些脂溶性维生素的缺乏是夜盲症和佝偻病等疾病的重要诱因。第四,一些畜禽油脂还具有特殊的生理功效,特别是在调控脂代谢与抵抗氧化损伤等方面;张佰帅等<sup>[55]</sup>证实,鹅油具有调节小鼠血脂代谢的功能,还能够有效抵抗脂质过氧化对细胞的损伤,并起到一定的抗动脉粥样硬化功能;张玉龙<sup>[56]</sup>发现,鸭油能够有效缓解油酸诱导的HepG2细胞脂堆积、胰岛素抵抗和氧化应激损伤;龙霞等<sup>[57]</sup>发现,鸭油可能通过激活小鼠肝脏的KELCH样ECH关联蛋白1/核因子E2相关因子2信号通路改善D-半乳糖诱导的氧化应激损伤。

### 1.3 畜禽动物油的加工利用现状

与植物油的精炼工艺类似,畜禽动物油脂的精炼同样需要进行脱胶、脱酸、脱色和脱臭等处理,以去除其中的残留的蛋白质、磷脂、游离脂肪酸、色素和醛类酮类与低级酸类气味物质,从而得到精炼畜禽动物油。精炼的工艺和标准不同,精炼动物油的成分及其含量也不尽相同,如脂肪酸的含量会在精炼后发生显著变化<sup>[58]</sup>。

目前,商品化的烹调用畜禽动物油很少,其应用主要体现在以下几个方面。首先,牛脂、猪脂和羊脂

等畜禽动物油具有良好的可塑性和起酥性以及特殊的香味,多用于烘焙食品、糕点起酥、人造奶油以及火锅底料等方面。其次,畜禽动物油脂是制备肉味香精的常用原料,常用的制备方法包括可控氧化、氧化-酶解、氧化-美拉德反应和脂肪氧化酶氧化4种,基于畜禽动物油脂制备的肉味香精香气饱满浓郁,同时可以达到减盐增咸的效果<sup>[59]</sup>。第三,畜禽动物油被广泛用于结构脂的加工,如MAG<sup>[60]</sup>、DAG<sup>[61]</sup>、人乳脂替代品<sup>[62]</sup>,这些结构脂通常具有特定的理化性质、特殊的生理活性和功能。第四,畜禽动物油可以通过结晶法、乳化法和酯化法制备液化动物油,进而有效促进畜禽动物油脂在食品工业中的应用范围<sup>[63]</sup>。第五,畜禽动物油可以用于制备粉末化动物油,常用的制备方法包括固化粉碎法、喷雾冷却法、分子微胶囊法、吸附法、喷雾干燥法,这些粉末动物油脂具有受温度影响小、分散性和水溶性好等特点,有助于改善食品的品质,延长保质期<sup>[64]</sup>。第六,畜禽动物油脂还可以用于开发低胆固醇保健油脂,常用的方法包括 $\beta$ -环糊精包埋法<sup>[65-66]</sup>和中草药精炼法<sup>[67]</sup>等,这些低胆固醇动物油可用于曲奇饼干等酥皮类点心的制作,其安全性显著高于植物黄油曲奇饼干<sup>[68]</sup>。第七,畜禽动物油被广泛应用于制备生物柴油,制备方法包括化学法和生物酶法两种途径<sup>[69]</sup>,常用的底物包括牛脂<sup>[70]</sup>、猪脂<sup>[71]</sup>、鸡油<sup>[72]</sup>、鸭油<sup>[73]</sup>和羊脂<sup>[74]</sup>等,与化石燃料相比,此种方法制备的生物柴油具有可再生、无毒、生物可降解以及润滑特性好等优势。第八,畜禽动物油在日化行业如肥皂、甘油、润滑油和皮革的加工中也应用广泛<sup>[75]</sup>。用于制备生物柴油和日化行业的畜禽动物油通常来源于一些卫生指标相对较低或炼制工艺比较粗糙的动物油。

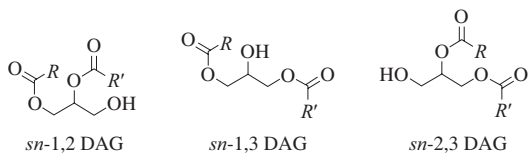
## 2 畜禽动物油DAG

### 2.1 畜禽动物油DAG的结构特征

DAG的甘油骨架上仅有两个羟基与脂肪酸结合的构脂。DAG是天然的油脂成分,大多为动植物甘油酯在



体内转化的中间体，其在不同动植物中的比例也不尽相同，而且质量分数都很低，一般不超过10%，不易于分离提纯。禽畜动物油DAG具备DAG类油脂的共性特征，可分为 $sn$ -1,2-DAG、 $sn$ -2,3-DAG和 $sn$ -1,3-DAG 3种立体异构体（图1）。 $sn$ -1,3-DAG呈V形构象，而 $sn$ -1,2-DAG呈发夹状构象。 $sn$ -1,3-DAG在热力学上比 $sn$ -1,2(2,3)-DAG更加稳定，所以天然的DAG中 $sn$ -1,3-DAG比 $sn$ -1,2-DAG的含量高，二者的比例接近2:1<sup>[76]</sup>。由于DAG分子结构上有一个裸露的羟基（可作为氢键供体，而TAG无氢键供体），其熔点比相同脂肪酸组成的TAG高（分子间形成氢键所致）。



R和R'为饱和或不饱和脂肪酸。下同。

图1 DAG的分子结构

Fig. 1 Molecular structure of DAG

据报道，动物油DAG的熔点比其对应的TAG高约5℃，且其熔点会随着DAG纯度的升高而升高<sup>[77]</sup>。此外，动物油DAG的氧化稳定性与DAG的含量呈负相关<sup>[78-79]</sup>，其黏度低于其对应的TAG<sup>[35]</sup>。与动物油TAG相比，其对应的DAG晶体颗粒小且分布均匀，晶体网络更加致密，晶型分析显示，动物油TAG主要为β型，因此，口感上表现为粗糙易碎，其对应的DAG表现为β和β'两种晶型共存，且以β'晶型为主，因此口感上较为光滑细腻<sup>[77]</sup>。

DAG结构的特异性还使其具备了特殊的生理活性。与TAG不同，1,3-DAG经过胰脂肪酶水解后的产物为 $sn$ -1(3)MAG、甘油和游离脂肪酸，缺少了TAG在体内再合成的关键底物 $sn$ -2MAG（图2）。因此，摄入1,3-DAG可以增加人体的脂肪代谢，减少TAG的再合成，进而降低血脂水平<sup>[80]</sup>。除了可以有效预防肥胖外，1,3-DAG还具有促进心血管健康、调节葡萄糖代谢和增加骨密度等功效<sup>[81]</sup>。

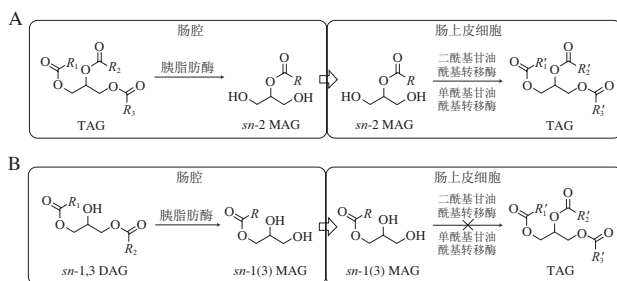


图2 TAG (A) 和DAG (B) 的代谢途径

Fig. 2 Metabolic pathways of triacylglycerol (A) and DAG (B)

## 2.2 禽畜动物油DAG的主要用途

DAG在食品中的应用主要包含以下4个方面：第一，可以在蛋黄酱和冰淇淋制作中用作乳化剂；第二，

可以在人造黄油和起酥油中用作结晶改良剂；第三，可以在肉制品加工过程中作为脂肪替代品；第四，可以代替TAG用作烹调油。对于禽畜动物油DAG在食品工业中的应用，猪脂DAG和鸭油DAG最为广泛。作为良好的乳化剂，猪脂DAG常被用于乳化肉制品的加工<sup>[82]</sup>，采用猪脂DAG作为脂肪替代品制备的肉糜具有更好的保水性和弹性，质地更加紧实，不易出现脂肪分离现象<sup>[61]</sup>。猪脂DAG与肌原纤维蛋白形成的复合胶体比猪脂TAG与其形成的复合胶体具有更高的渗透力和持水性，结构也更加致密有序<sup>[83-85]</sup>。采用鸭油DAG煎炸的牛肉饼可以显著降低失水率，增加肉质嫩度<sup>[35]</sup>，鸭油DAG还具有一定的抑菌防腐作用，其与壳聚糖的混合物可以有效延缓肉糜的pH值升高、抑制微生物繁殖和脂质氧化，进而延长肉糜的保鲜期<sup>[86-87]</sup>，鸭油DAG可以显著提高脱脂奶粉的稳定性，增加香味<sup>[88]</sup>。

此外，鸭油DAG和鹅油DAG还具有显著的生理活性，特别是1,3-DAG。第一，同植物油DAG一样，禽畜动物油DAG同样具有显著的减肥效果。Wang Baowei<sup>[89]</sup>和孙宇<sup>[90]</sup>等发现，鸭油DAG（DAG质量分数分别为94%、86%）可以显著刺激高脂饮食大鼠的脂质代谢，减少脂肪堆积，从而起到抑制肥胖的效果。第二，禽畜动物油DAG还可以作为具有潜在价值的肠道炎症健康修复剂。刘亚楠等<sup>[91]</sup>发现，鸭油DAG（质量分数>85%）与VD<sub>3</sub>联合使用对结肠炎大鼠的结肠肠道发育具有显著的促进作用；王茜等<sup>[92]</sup>发现，鸭油DAG（质量分数>85%）与壳聚糖联合使用可以有效促进溃疡性结肠炎小鼠的结肠组织发育；丛红霞等<sup>[93]</sup>发现，鸭油DAG（质量分数>85%）与VK<sub>1</sub>联合使用可以有效促进溃疡性结肠炎小鼠肠道组织的修复发育；徐慧心等<sup>[94]</sup>证实，鹅油DAG（质量分数>92.57%）和天蚕素抗菌肽联合使用同样可以有效治疗小鼠溃疡性结肠炎；谢玉娥等<sup>[95]</sup>发现，鹅油DAG（质量分数>90%）有助于优化盲肠微生物的菌群结构，进而调整肠道微生态失调。第三，禽畜动物油DAG在促进骨骼发育方面也表现出一定的效果。刘亚楠等<sup>[96]</sup>发现，鸭油DAG（质量分数>90%）与VD<sub>3</sub>联合使用能够显著提高胫骨的骨密度和骨强度，降低骨源性碱性磷酸酶活性，从而促进胫骨发育。

## 3 禽畜动物油DAG的酶法制备

### 3.1 用于DAG制备的酶制剂

DAG的制备方法主要有化学法和生物酶法两种。其中，化学法大多需要高温、强酸强碱、高压等条件，会产生较多有害物质，反应可控性差。相较之下，生物酶法反应条件温和、专一性强、副产物少<sup>[97]</sup>。作为制备DAG的高效生物催化剂，脂肪酶来源广泛，在

动植物和微生物体内均普遍存在。动植物来源的脂肪酶大多存在催化活性单一、产量低、稳定性差、提取成本高等缺点<sup>[98]</sup>，因此，目前国内外常采用微生物来源的脂肪酶制备DAG<sup>[85]</sup>。常见的脂肪酶生产菌株包括产碱假单胞菌 (*Pseudomonas alcaligenes*)、铜绿假单胞菌 (*Pseudomonas aeruginosa*)、莓实假单胞菌 (*Pseudomonas fragi*)、荧光假单胞菌 (*Pseudomonas fluorescens*)、枯草芽孢杆菌 (*Bacillus subtilis*)、尼氏芽孢杆菌 (*Bacillus nealsonii*)、球形马拉色菌 (*Malassezia globosa*)、扩展青霉 (*Penicillium expansum*)、木霉 (*Trichoderma*)、产黄青霉 (*Penicillium chrysogenum*)、黑曲霉 (*Aspergillus niger*)、米黑根毛霉 (*Rhizomucor miehei*)、疏棉状嗜热霉 (*Thermomyces lanuginosus*) 和南极假丝酵母 (*Candida antarctic*) 等<sup>[99-104]</sup>。因游离酶存在难回收、易失活等缺点，所以工业生产中常需要对脂肪酶进行固定化处理，这些固定化的载体大多为树脂或硅胶等材料。固定化的脂肪酶具有良好的稳定性和环境耐受性，并且易于回收，适用于连续化的工业生产<sup>[98]</sup>。目前，广泛应用于DAG制备的3种商品化固定化脂肪酶是由丹麦诺信公司生产的Novozym 435 (来源于南极假丝酵母)、Lipozyme TL IM (来源于疏棉状嗜热霉) 和Lipozyme RM IM (来源于米黑根毛霉)。

### 3.2 酶法制备禽畜动物油DAG的工艺

酶法合成DAG的途径主要包括甘油解、酯化、部分水解和酯交换4种制备工艺(图3)，每一种工艺对脂肪酶催化性质的要求都不尽相同。

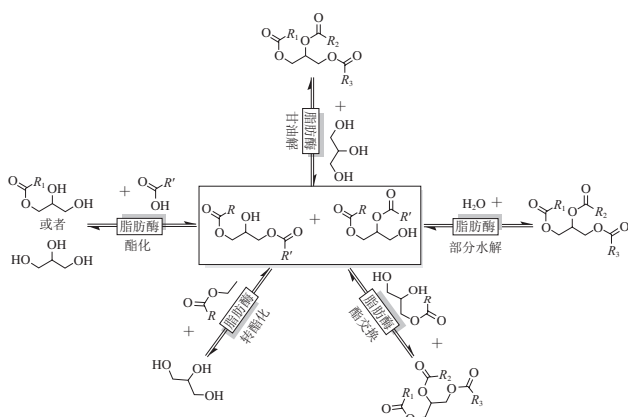


图3 DAG的酶法合成途径

Fig. 3 Enzymatic synthesis pathway of DAG

#### 3.2.1 酶法甘油解反应

第1种常用的DAG制备方法是甘油解反应，该反应是在相对温和的反应温度下通过脂肪酶催化TAG的酰基转移至甘油而合成DAG的一种途径。酶法制备DAG反应具有催化效率高、产物纯度高、副反应少和环境污染小等优点，还可以有效降低缩水甘油酯的产生<sup>[105]</sup>。然而，

在甘油解反应体系中，底物黏度较大，所需反应温度较高，因此脂肪酶的活性会受到一定程度的影响，有时还需要加入溶剂改善体系黏度，然而溶剂的引入会导致产物纯化繁琐。

Yamane<sup>[106]</sup>和Kang<sup>[107]</sup>等以氢化牛脂为底物，分别以假单胞菌脂肪酶 (EC 3.1.1.3)、*Pseudomonas* 脂肪酶 (EC 3.1.1.3) 为催化剂，利用甘油解反应制备了氢化牛脂DAG，在最优反应条件下，氢化牛脂DAG的得率分别达到90% (其中1,3-DAG的得率达到95%) 和71%。Diao Xiaoqin等<sup>[82]</sup>以猪脂为底物、Lipozyme RM IM为催化剂，利用甘油解反应制备了猪脂DAG，在最优反应条件下，猪脂DAG的得率达到61.76%，产物经分子蒸馏纯化后，DAG质量分数高达82.03%。赵欣欣等<sup>[108]</sup>以猪脂为底物，Lipozyme RM IM为催化剂，利用甘油解反应制备了猪脂DAG，研究发现，超声波辅助处理可以显著缩短甘油解反应时间，在最佳超声波辅助条件下，DAG的得率可达46.91%。Cheong<sup>[109]</sup>和万倪彤<sup>[110]</sup>等以为猪脂底物、Novozym 435为催化剂，利用甘油解反应制备了DAG，在最优反应条件下，DAG的得率分别达到48%和46%。Miklos等<sup>[61]</sup>同样以猪脂为底物，Novozym 435为催化剂，利用甘油解反应制备了高纯度DAG，产物经分子蒸馏纯化后，DAG的质量分数高于94%。综上，甘油解反应DAG产物得率约为40%~90%，产物进一步经分子蒸馏纯化后，1,3-DAG质量分数为52%~86%。

#### 3.2.2 酶法酯化反应

第2种常用的DAG制备方法是酯化反应，该反应是以甘油或MAG与游离脂肪酸为底物，在脂肪酶的催化下合成DAG的一种途径，具有反应时间短和产物纯度高等优点，因此，高纯度DAG (质量分数80%) 的工业化生产大多通过 $sn$ -1,3位选择性强的脂肪酶Lipozyme RM IM催化酯化来实现。然而，直接酯化法的生产成本要比甘油解法的成本高出许多。王宝维等<sup>[111-112]</sup>分别以鹅油脂肪酸、鸭油脂肪酸和甘油为底物，以固定化CALB为催化剂，以底物比、酶加量、反应时间和温度为考察因素，通过响应面法对鹅油DAG和鸭油DAG的制备工艺进行了优化，在最佳工艺条件下，鹅油DAG和鸭油DAG的得率分别达到92.57%和93.92%。韩海娜<sup>[113]</sup>以鹅油脂肪酸和甘油为底物，以Novozym 435为催化剂，在最佳工艺条件下 (温度46 °C、时间9.2 h、鹅油脂肪酸:甘油=1.12 (质量比)、酶添加量3.03%)，鹅油DAG的得率达到92.57%。综上，酯化反应的DAG产物得率达到90%以上。

#### 3.2.3 部分水解反应

第3种常用的DAG制备方法是部分水解反应，该反应是利用脂肪酶催化TAG生成DAG、MAG和游离脂肪酸的途径，进而通过分子蒸馏除去水分、MAG、TAG和游离脂肪酸后即可获得高纯度DAG，常用脂肪酶

Lipozyme RM IM作为催化剂,该方法操作简单,且成本较低。孙敏甜<sup>[114]</sup>以鸡油为底物,以脂肪酶Lvk-01为催化剂,通过部分水解反应制备了鸡油DAG,当酶加量为20 U/g、蒸馏水添加量为15%时,在40 °C条件下反应2.5 h后,产物中DAG的质量分数达到41.99% (表3)。

### 3.2.4 酶法酯交换反应

第4种常用的DAG制备方法是酯交换反应,该反应是以TAG和MAG为底物,在脂肪酶的催化下合成DAG的一种途径,常用脂肪酶Lipozyme TL IM作为催化剂。这种方法主要用于植物油DAG的制备,目前鲜有报道采用此途径合成动物油DAG,由于MAG是一种价格相对比较昂贵的底物,因此,酯交换反应并不具备较好的工业化前景。

### 3.2.5 其他工艺路径

第5种常用的DAG制备方法是脂肪酶介导的多步级联反应,该方法需要先将油脂通过醇解反应制成脂肪酸乙酯,进而再利用脂肪酶催化脂肪酸乙酯和甘油合成DAG,常用脂肪酶Lipozyme RM IM作为催化剂。该方法与直接酯化法类似,操作简单,产物得率高。曲可心等<sup>[115]</sup>先利用化学法将牛脂与乙醇经过乙醇解反应制得牛脂乙酯,进而以牛脂乙酯和甘油为底物,在脂肪酶Lipozyme RM IM的催化下制备了牛脂sn-1,3 DAG,在最佳反应条件下,sn-1,3 DAG的得率达到72.5%,产物经弗罗里硅土提纯后,sn-1,3 DAG质量分数为90.79%。

部分水解反应制备DAG,该方法是利用脂肪酶催化TAG生成DAG、MAG和游离脂肪酸,通过分子蒸馏除去水分、MAG、TAG和游离脂肪酸后即可获得高纯度DAG,常用脂肪酶Lipozyme RM IM作为催化剂,该方法操作简单,且成本较低。

### 3.3 酶法改性制备禽畜动物油DAG与植物油DAG的对比

通常,禽畜动物油的饱和脂肪酸含量(表1)显著高于植物油的含量,而饱和脂肪酸含量与熔点呈正相关<sup>[117]</sup>,因此,禽畜动物油的熔点(表2)远高于植物油,室温下呈固态。一方面,固态底物传质效率低;另一方面,脂肪酶为界面酶,固态底物接触面积小,因此,基于固态动物油为底物、脂肪酶为催化剂的反应体系难以在低温条件下实现高效的酶法催化,升高反应体系温度使动物油由固态转化为液态成为了制备动物油DAG的先决条件。然而,多数脂肪酶的最适反应温度低于动物油(特别是牛脂、羊脂和猪脂)的熔点,因此,与植物油DAG的酶法制备不同,制备动物油DAG时尤其要选择温度耐受性高的脂肪酶,例如Novozyme 435、Lipozyme TL IM等。此外,在溶剂体系中(例如正己烷、叔丁醇等)开展动物油DAG的酶法制备也是切实可行的方案,溶剂的引入有助于固态动物油的溶解,从而降低反应体系的温度。

## 4 结 语

禽畜动物油脂的高值化利用一直是困扰畜禽产品加工企业的一大难题,借鉴植物油DAG的产业化加工途径,利用生物酶法制备高附加值的禽畜动物油DAG为实现禽畜动物油脂的高值化利用提供了一个有价值的产业化方向。改性后的禽畜动物油DAG不但可以作为食品工业中优良的乳化剂和脂肪替代品,还可以作为烹调用油使用,此外,一些禽畜动物油DAG还具有特殊的生理功效,如控制肥胖、改善肠道炎症和促进骨骼发育等,因此,这些禽畜动物油DAG甚至有潜力成为保健品行业的新型高端产品。随着禽畜动物油DAG生物酶法加工途径的日渐成熟,其高值化利用必将为畜禽加工企业创收添益。

### 参考文献:

[1] 周雅琳,李洪军,霍俊峰,等.我国肉制品工业现状与发展趋势[J].肉类研究,2000,14(3):8-10;15. DOI:10.3969/j.issn.1001-8123.2000.03.002.

[2] 张德权,惠腾,王振宇.我国肉品加工科技现状及趋势[J].肉类研究,2020,34(1):1-8. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20191029-256.

[3] 包音都古荣·金花, HESHUOTE M, 呼格吉勒图,等.动物性油脂和植物油的安全性分析与评价[J].中国畜牧兽医,2016,43(4):1111-1117. DOI:10.16431/j.cnki.1671-7236.2016.04.039.

[4] 李悦,钟南京,李洪广.酶法制备甘油二酯的研究进展[J].中国油脂,2022,47(6):77-84. DOI:10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.210276.

[5] 连伟帅.甘油二酯、LML型结构脂的酶法制备与应用研究[D].广州:华南理工大学,2019. DOI:10.27151/d.cnki.ghnlu.2019.004220.

[6] 陈彦婕,唐嘉诚,官萱,等.鱼油提取、多不饱和脂肪酸富集及EPA和DHA的应用研究进展[J].食品与机械,2021,37(11):205-210;220. DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2021.11.036.

[7] 雷伟晨,祝振杰,肖亚浩,等.酶促油酸与棕榈硬脂反应制备OPO工艺条件优化[J].中国油脂,2022,47(4):64-71. DOI:10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.210771.

表3 酶法改性制备禽畜动物油DAG

Table 3 Recent studies on enzymatic production of DAG from livestock and poultry fats

反应类型	动物油	脂肪酶	加酶量	底物比	温度/°C	DAG得率/%	纯化后质量分数/%	参考文献
甘油解	猪油	RM IM	14%	1:1 <sup>a</sup>	65	61.76	82.03	[116]
	猪油	Novozyme 435	9%	1:2.27 <sup>a</sup>	55	44.63	—	[110]
	猪油	Novozyme 435	10%	1:1 <sup>a</sup>	70	—	>94	[61]
	猪油	Novozyme 435	7%	9:1	65	48	—	[109]
	牛油	Lipozyme RM IM	1%	1:1 <sup>a</sup>	50	72.5	90.79	[115]
	牛油	Lipozyme RM IM	3%	1:1	45	46.43	—	[108]
酯化	牛油	<i>Pseudomonas</i> 脂肪酶	—	1:2 <sup>a</sup>	60/55/48	90	—	[106]
	鹅油	Novozym 435	3.03%	1:1.12 <sup>a</sup>	46	92.57	—	[111]
	鸭油	固定化南极假丝酵母脂肪酶	1.65%	1:2.02 <sup>a</sup>	54	94.08	—	[112]
部分水解	鸡油	脂肪酶Lvk-01	20 U/g	—	40	>30	41.99	[114]
其他工艺路径	牛油	Lipozyme RM IM	1%	2:1	50	72.5	90.79	[115]

注:底物比为甘油:动物油或甘油:动物油乙酯或甘油:动物油脂肪酸;#.质量比;\*.物质的量比。



- [8] CASTEJÓN N, SEÑORÁNS F J. Enzymatic modification to produce health-promoting lipids from fish oil, algae and other new omega-3 sources: a review[J]. *New Biotechnol*, 2020, 57: 45-54. DOI:10.1016/j.nbt.2020.02.006.
- [9] FLICKINGER B D, MATSUO N. Nutritional characteristics of DAG oil[J]. *Lipids*, 2003, 38(2): 129-132. DOI:10.1007/s11745-003-1042-8.
- [10] LEE Y Y, TANG T K, PHUAH E T, et al. Production, safety, health effects and applications of diacylglycerol functional oil in food systems: a review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2020, 60(15): 2509-2525. DOI:10.1080/10408398.2019.1650001.
- [11] 韩世鹤, 李小平, 田呈瑞. 鸵鸟油的提取及脂肪酸的GC-MS分析[J]. *食品工业科技*, 2010, 31(2): 269-271. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2010.02.081.
- [12] 黄立兰, 黄广明. 2016年不同来源饲用油脂的脂肪酸组成分析[J]. *饲料工业*, 2017, 38(11): 41-45. DOI:10.13302/j.cnki.fi.2017.11.008.
- [13] 魏永生, 郑敏燕, 耿薇, 等. 常用动、植物食用油中脂肪酸组成的分析[J]. *食品科学*, 2012, 33(16): 188-193.
- [14] 龙霞, 宁俊丽, 丁晓雯. 家禽油脂功能性研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(1): 259-264. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.017231.
- [15] 樊雨梅, 汝文文, 廖峰, 等. 驴油与3种常见动物油脂品质比较研究[J]. *中国油脂*, 2019, 44(2): 109-112; 126. DOI:10.3969/j.issn.1003-7969.2019.02.025.
- [16] 王同珍, 陈孝建, 安爱, 等. 气相色谱-质谱技术结合化学计量学对5种动物油进行判别分析[J]. *分析测试学报*, 2016, 35(5): 557-562. DOI:10.3969/j.issn.1004-4957.2016.05.010.
- [17] 陈喆, 王督, 汪雪芳, 等. 食用油中掺入低价动物油脂鉴别方法的研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(22): 8912-8917. DOI:10.19812/j.cnki.jfsq.11-5956/ts.2021.22.039.
- [18] 朱文冉, 王欣, 陈利华. 掺杂猪油比例对花生油脂肪酸组成及LF-NMR弛豫特性的影响[J]. *食品科学*, 2016, 37(12): 176-181. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201612031.
- [19] 赵海珍, 陆兆新, 别小妹, 等. 高效液相色谱法测定猪油甘油三酯中的脂肪酸位置分布[J]. *色谱*, 2005, 23(2): 142-145. DOI:10.3321/j.issn:1000-8713.2005.02.006.
- [20] 王宇萌, 朱琳, 闻晓鑫, 等. 獐子油、猪油、蛇油脂肪酸成分的分析比较[J]. *中国现代中药*, 2017, 19(6): 767-770. DOI:10.13313/j.issn.1673-4890.2017.6.007.
- [21] 井银成, 范璐, 杨国龙, 等. 基于脂肪酸分析识别猪油和鸡油[J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2011, 32(6): 40-44. DOI:10.1378/N.20111220.1501.009.
- [22] 赵婷婷, 王欣, 刘宝林, 等. 煎炸猪油掺杂比例对猪油低场核磁共振弛豫特性及脂肪酸组成的影响[J]. *食品科学*, 2015, 36(1): 6-12. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201501002.
- [23] 项云, 刘波静, 屠平光, 等. 金华猪胴体脂肪酸组成研究[J]. *浙江畜牧兽医*, 2018, 43(3): 1-4.
- [24] 陈帅, 张林尚, 毕艳兰. 响应面优化猪油自身分子重组工艺的研究[J]. *中国油脂*, 2015(8): 37-41. DOI:10.3969/j.issn.1003-7969.2015.08.010.
- [25] 陈洪建, 李进伟, 刘元法. 猪油与棕榈硬脂酶法酯交换制备零反式脂肪酸起酥油的性质研究[J]. *中国油脂*, 2013, 38(10): 27-30. DOI:10.3969/j.issn.1003-7969.2013.10.008.
- [26] 夏莹. 猪油与棕榈油混合体系的相容性研究与应用[D]. 无锡: 江南大学, 2014: 13-44.
- [27] 张颂培. 猪油脂的开发及其在食品中的应用[J]. *肉类工业*, 2002(4): 22-25. DOI:10.3969/j.issn.1008-5467.2002.04.007.
- [28] 许浮萍. 驴油总脂肪酸及sn-2位脂肪酸组成分析[J]. *中国油脂*, 2016, 41(7): 99-101. DOI:10.3969/j.issn.1003-7969.2016.07.023.
- [29] 史传超, 解晓, 樊雨梅, 等. 驴脂组成成分及其油脂的品质指标分析[J]. *中国油脂*, 2020, 45(7): 130-136. DOI:10.12166/j.zgyz.1003-7969/2020.07.028.
- [30] 李向阳, 赵飞, 孙思远, 等. 鸡油的化学成分及制备工艺研究[J]. *粮油食品科技*, 2017, 25(3): 44-47. DOI:10.3969/j.issn.1007-7561.2017.03.009.
- [31] 杨黎, 李耀. 精制纯鸡油的营养价值及应用研究[J]. *中国调味品*, 2012, 37(4): 60-63. DOI:10.3969/j.issn.1000-9973.2012.04.015.
- [32] 肖作兵, 吴旻玲, 牛云蔚. 温控氧化鸡脂对脂肪酸组成及鸡肉香气风味的影响[J]. *中国食品学报*, 2016, 16(9): 144-150. DOI:10.16429/j.1009-7848.2016.09.020.
- [33] 王晓晓, 李珂, 万乃宝, 等. 饲用鸭油对猪的营养价值评定[J]. *饲料工业*, 2013(14): 52-54. DOI:10.3969/j.issn.1001-991X.2013.14.014.
- [34] 朱立. 鸭油的营养价值及其对生长育肥猪生产性能、胴体性状和肉品质的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2014: 12-15.
- [35] 杨洵, 王宝维, 凡文磊, 等. 鸭油甘油二酯食用理化性质分析及油炸牛肉烹调特性评价[J]. *食品科技*, 2022, 47(1): 145-151. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2022.01.027.
- [36] 欧秀琼, 钟正泽, 解华东, 等. 鸭油提取工艺研究[J]. *中国油脂*, 2020, 45(9): 8-11. DOI:10.12166/j.zgyz.1003-7969/2020.09.002.
- [37] 叶金玲, 朱翠, 张铁钧, 等. 鹌鹑油的应用研究进展[J]. *经济动物学报*, 2019, 23(4): 240-244. DOI:10.13326/j.jea.2017.12.79.
- [38] 李娟, 李小瑞. 鹌鹑油的综合开发利用[J]. *精细与专用化学品*, 2003, 11(24): 14-15. DOI:10.3969/j.issn.1008-1100.2003.24.006.
- [39] 薛莹, 董根春, 张安将, 等. 鸵鸟精油脂肪酸组成的GC/MS分析[C]//2010年全国质谱大会暨第三届世界华人质谱研讨会论文集. 2010: 212-213.
- [40] 石芳萍, 孙超, 师志贤, 等. 鸵鸟油的化学成分分析及利用[J]. *畜牧兽医杂志*, 2014, 33(5): 11-14. DOI:10.3969/j.issn.1004-6704.2014.05.005.
- [41] 伍发云. 鸵鸟油化学成分及生物活性的研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2010: 15-24. DOI:10.7666/d.y1799288.
- [42] 杨秀芳, 伍发云, 马养民, 等. 鸵鸟油理化性质及脂肪酸组成分析[J]. *中国油脂*, 2010, 35(1): 77-79.
- [43] 杨秀芳, 伍发云, 马养民, 等. 鸵鸟油综合开发利用[J]. *粮食与油脂*, 2009(12): 11-13. DOI:10.3969/j.issn.1008-9578.2009.12.004.
- [44] 陈誉. 鸵鸟油提取及其对青藤碱的促透作用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014: 13-25.
- [45] PANG M, GE Y F, CAO L L, et al. Physicochemical properties, crystallization behavior and oxidative stabilities of enzymatic interesterified fats of beef tallow, palm stearin and camellia oil blends[J]. *Journal of Oleo Science*, 2019, 68(2): 131-139. DOI:10.5650/jos.ess18201.
- [46] 张杰, 薛艳霞, 李昌禹, 等. 火锅底料中两种动物油脂的风味与感官特性对比研究[J]. *中国调味品*, 2020, 45(8): 16-19; 30. DOI:10.3969/j.issn.1000-9973.2020.08.004.
- [47] 樊雨梅, 帖航, 赵海晴, 等. 驴油提升皮肤屏障功能及潜在作用机制研究[J]. *日用化学工业*, 2022, 52(6): 626-631. DOI:10.3969/j.issn.1001-1803.2022.06.008.
- [48] FARMANI J, ROSHANI S, GHABOOS H. Physicochemical properties of chicken fat as affected by rendering condition[J]. *Advances in Food Sciences*, 2016, 38(1): 35-43.
- [49] FARMANI J, ROSTAMMIRI L. Characterization of chicken waste fat for application in food technology[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2015, 9(2): 143-150. DOI:10.1007/s11694-014-9219-y.
- [50] XIANG Q Y, TIAN F, LIN Q Z, et al. Comparison of remnant cholesterol levels estimated by calculated and measured LDL-C levels in Chinese patients with coronary heart disease[J]. *Clinica Chimica Acta*, 2019, 500: 75-80. DOI:10.1016/j.cca.2019.09.020.
- [51] ZHANG X, HUANG Q, WANG X, et al. Dietary cholesterol is essential to mast cell activation and associated obesity and diabetes in

- mice[J]. *Biochimica et Biophysica Acta-Molecular Basis of Disease*, 2019, 1865(6): 1690-1700. DOI:10.1016/j.bbdis.2019.04.006.
- [52] LI J X, CAO J, LU X F, et al. The effect of total cholesterol on myocardial infarction in Chinese male hypertension population[J]. *Biomedical and Environmental Sciences*, 2010, 23(1): 37-41. DOI:10.1016/S0895-3988(10)60029-3.
- [53] BARENDSE W. Should animal fats be back on the table? A critical review of the human health effects of animal fat[J]. *Animal Production Science*, 2014, 54(7): 831-855. DOI:10.1071/AN13536.
- [54] WEBB E C, O'NEILL H A. The animal fat paradox and meat quality[J]. *Meat Science*, 2008, 80(1): 28-36. DOI:10.1016/j.meatsci.2008.05.029.
- [55] 张佰帅, 王宝维, 葛文华, 等. 不同剂量鸭油对小鼠血脂代谢及抗氧化能力的影响[J]. *中国油脂*, 2012, 37(3): 31-35. DOI:10.3969/j.issn.1003-7969.2012.03.008.
- [56] 张玉龙. 鸭油对油酸诱导的HepG2细胞脂代谢、氧化应激与胰岛素敏感性的影响[D]. 合肥: 安徽大学, 2021: 19-42.
- [57] 龙霞, 黄先智, 丁晓雯. 鸭油对D-gal诱导小鼠氧化应激的改善作用[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(19): 90-97. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.021085.
- [58] 刘娜, 靳林溪, 王伟. 基于非极性柱气质联用测定脂肪酸差异鉴别动物油脂[J]. *食品工业*, 2022, 43(3): 270-275.
- [59] 韦仕静, 林喆, 姚崇, 等. 食用动物油脂制备肉味香精的研究现状[J]. *中国食品添加剂*, 2021, 32(2): 123-127. DOI:10.19804/j.issn1006-2513.2021.02.019.
- [60] 杨昌英, 潘家荣, 钟珩, 等. 醋酸纤维素固定化脂肪酶催化猪油合成单甘酯[J]. *湖北化工*, 2002, 19(6): 20-21. DOI:10.3969/j.issn.1672-5425.2002.06.008.
- [61] MIKLOS R, XU X, LAMETSCH R. Application of pork fat diacylglycerols in meat emulsions[J]. *Meat Science*, 2011, 87(3): 202-205. DOI:10.1016/j.meatsci.2010.10.010.
- [62] 朱启思, 唐家毅, 周琮, 等. 猪油酸解制备人乳脂替代品的研究[J]. *中国油脂*, 2009, 34(2): 39-42. DOI:10.3321/j.issn:1003-7969.2009.02.011.
- [63] 朱巍. 猪油液化及降胆固醇加工技术研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2017: 1-9.
- [64] 张东明, 吴潇, 马美湖. 猪膘脂肪液化利用研究进展[J]. *肉类研究*, 2009(5): 75-83. DOI:10.3969/j.issn.1001-8123.2009.05.021.
- [65] 李相昕, 张旭, 任悦, 等.  $\beta$ -环糊精脱除猪油中胆固醇的研究[J]. *中国油脂*, 2016, 41(3): 46-50. DOI:10.3969/j.issn.1003-7969.2016.03.011.
- [66] 刘琳, 谢勇, 刘越, 等. 低胆固醇牛油的制备及其理化性质分析[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(22): 187-195. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.024755.
- [67] 陈少东, 邓小莲, 谢光盛. 低胆固醇保健猪油的研制[J]. *中国油脂*, 1999, 24(2): 7.
- [68] 邹晴晴. 低胆固醇猪油曲奇饼干的研制及其货架期预测[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2017: 7-42.
- [69] ADEWALE P, DUMONT M J, NGADI M. Recent trends of biodiesel production from animal fat wastes and associated production techniques[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 45: 574-588. DOI:10.1016/j.rser.2015.02.039.
- [70] DA RÓS P C M, SILVA G M, MENDES A A, et al. Evaluation of the catalytic properties of *Burkholderia cepacia* lipase immobilized on non-commercial matrices to be used in biodiesel synthesis from different feedstocks[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(14): 5508-5516. DOI:10.1016/j.BRSER.2015.02.039.
- [71] ADEWALE P, DUMONT M J, NGADI M. Enzyme-catalyzed synthesis and kinetics of ultrasonic-assisted biodiesel production from waste tallow[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2015, 27: 1-9. DOI:10.1016/j.ultsonch.2015.04.032.
- [72] ALPTEKIN E, ÇANAKÇI M E. Optimization of transesterification for methyl ester production from chicken fat[J]. *Fuel*, 2011, 90(8): 2630-2638. DOI:10.1016/J.FUEL.2011.03.042.
- [73] CHUNG K H, KIM J, LEE K Y. Biodiesel production by transesterification of duck tallow with methanol on alkali catalysts[J]. *Biomass & Bioenergy*, 2009, 33(1): 155-158. DOI:10.1016/J.BIOMBIOE.2008.04.014.
- [74] MUTREJA V, SINGH S, ALI A. Biodiesel from mutton fat using KOH impregnated MgO as heterogeneous catalysts[J]. *Renewable Energy*, 2011, 36(8): 2253-2258. DOI:10.1016/J.RENENE.2011.01.019.
- [75] 吴海玥. 动物油脂生产加工技术研究进展[J]. *青海畜牧兽医杂志*, 2014, 44(1): 40-41. DOI:10.3969/j.issn.1003-7950.2014.01.025.
- [76] 孙纪录, 于宏伟, 王雪静, 等. 二酰甘油油脂的特性及其生产工艺研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2010, 31(5): 180-184. DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2010.05.054.
- [77] ZHAO X X, SUN Q X, QIN Z Y, et al. Ultrasonic pretreatment promotes diacylglycerol production from lard by lipase-catalysed glycerolysis and its physicochemical properties[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, 48: 11-18. DOI:10.1016/j.ultsonch.2018.05.005.
- [78] 刁小琴, 关海宁, 孔保华, 等. 纯化后甘油解猪油的热性质及结构特性分析[J]. *食品与发酵工业*, 2017, 43(4): 98-103. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.201704015.
- [79] SUN H L, LI F F, LI Y, et al. Effect of high-voltage electrostatic field heating on the oxidative stability of duck oils containing diacylglycerol[J]. *Foods*, 2022, 11(9): 1322. DOI:10.3390/foods11091322.
- [80] LAZAROW P B, DE DUVE C. A fatty acyl-CoA oxidizing system in rat liver peroxisomes; enhancement by clofibrate, a hypolipidemic drug[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1976, 73(6): 2043-2046. DOI:10.1073/pnas.73.6.2043.
- [81] FRIEDMAN H I, NYLUND B. Intestinal fat digestion, absorption, and transport. a review[J]. *American Journal of Clinical Nutrition*, 1980, 33(5): 1108-1139. DOI:10.1093/ajcn/33.5.1108.
- [82] DIAO X Q, GUAN H N, ZHAO X X, et al. Properties and oxidative stability of emulsions prepared with myofibrillar protein and lard diacylglycerols[J]. *Meat Science*, 2016, 115: 16-23. DOI:10.1016/j.meatsci.2016.01.001.
- [83] DIAO X Q, GUAN H N, ZHAO X X, et al. Physicochemical and structural properties of composite gels prepared with myofibrillar protein and lard diacylglycerols[J]. *Meat Science*, 2016, 121: 333-341. DOI:10.1016/j.meatsci.2016.07.002.
- [84] ZHAO X X, HAN G, WEN R X, et al. Influence of lard-based diacylglycerol on rheological and physicochemical properties of thermally induced gels of porcine myofibrillar protein at different NaCl concentrations[J]. *Food Research International*, 2020, 127: 108723. DOI:10.1016/j.foodres.2019.108723.
- [85] ZHAO X X, HAN G, SUN Q X, et al. Influence of lard-based diacylglycerol on the rheological and physicochemical properties of thermally induced pork myofibrillar protein gels at different pH levels[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 117: 108708. DOI:10.1016/j.lwt.2019.108708.
- [86] 杨洵, 王宝维, 王茜, 等. 鸭油甘油二酯与壳聚糖联合对鲜牛肉糜贮藏品质的影响[J]. *食品科技*, 2020, 45(10): 118-123. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2020.10.020.
- [87] 孙宇, 王宝维, 王茜, 等. 鸭油甘油二酯与壳聚糖协同对猪肉糜的防腐作用[J]. *现代食品科技*, 2020, 36(5): 122-128; 184. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2020.5.017.
- [88] 贺可琳, 王宝维, 葛文华, 等. 鸭油甘油二酯对脱脂奶粉的稳定性的研究[J]. *中国食品添加剂*, 2016(8): 153-161. DOI:10.3969/j.issn.1006-2513.2016.08.018.



- [89] WANG B W, ZHANG M A, GE W H, et al. Microencapsulated duck oil diacylglycerol: preparation and application as anti-obesity agent[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 101: 646-652. DOI:10.1016/j.lwt.2018.11.061.
- [90] 孙宇, 王宝维, 张名爱, 等. 鸭油甘油二酯对肥胖大鼠减肥降脂作用与机制研究[J]. 动物营养学报, 2022, 34(6): 4020-4031. DOI:10.3969/j.issn.1006-267x.2022.06.061.
- [91] 刘亚楠, 王宝维, 葛文华, 等. 鸭油甘油二酯和维生素D<sub>3</sub>对结肠炎大鼠结肠菌群、脾脏过氧化物酶体增殖物激活受体 $\gamma$  mRNA表达量及结肠组织发育的影响[J]. 动物营养学报, 2020, 32(3): 1382-1395.
- [92] 王茜, 王宝维, 葛文华, 等. 鸭油甘油二酯与壳聚糖联合应用对小鼠溃疡性结肠炎修复的影响[J]. 中国畜牧杂志, 2021, 57(1): 186-191. DOI:10.19556/j.0258-7033.20200316-04.
- [93] 丛红霞, 王宝维, 葛文华, 等. 鸭油甘油二酯与维生素K<sub>1</sub>协同对葡聚糖硫酸钠诱导的小鼠溃疡性结肠炎损伤的修复作用[J]. 动物营养学报, 2020, 32(9): 4376-4385. DOI:10.3969/j.issn.1006-267x.2020.09.048.
- [94] 徐慧心, 王宝维, 葛文华, 等. 鹅油甘油二酯与天蚕素抗菌肽合用对葡聚糖硫酸钠诱导的小鼠溃疡性结肠炎损伤的修复作用[J]. 动物营养学报, 2020, 32(8): 3877-3886. DOI:10.3969/j.issn.1006-267x.2020.08.046.
- [95] 谢玉娥, 王宝维, 葛文华, 等. 鹅油甘油二酯的体外抑菌效果及其对葡聚糖硫酸钠诱导大鼠盲肠微生物菌群结构的影响[J]. 动物营养学报, 2020, 32(1): 405-416. DOI:10.3969/j.issn.1006-267x.2020.01.047.
- [96] 刘亚楠, 王宝维, 葛文华, 等. 鸭油甘油二酯与维生素D<sub>3</sub>协同对肥胖SD大鼠器官指数、血液25羟维生素D<sub>3</sub>含量、胫骨发育指标及肝脏维生素D受体和过氧化物酶体增殖物激活受体 $\alpha$ 基因表达量的影响[J]. 动物营养学报, 2020, 32(1): 472-480. DOI:10.3969/j.issn.1006-267x.2020.01.055.
- [97] SENANAYAKE S, SHAHIDI F. Modification of fats and oils via chemical and enzymatic methods[M]. 6th ed. State of New Jersey: John Wiley & Sons, 2020: 1-29.
- [98] CHANDRA P, RANJAN SINGH E, KUMAR ARORA P. Microbial lipases and their industrial applications: a comprehensive review[J]. Microbial Cell Factories, 2020, 19(1): 169. DOI:10.1186/s12934-020-01428-8.
- [99] TANG L H, SU M, YAN J Z, et al. Lid hinge region of *Penicillium expansum* lipase affects enzyme activity and interfacial activation[J]. Process Biochemistry, 2015, 50(8): 1218-1223. DOI:10.1016/j.procbio.2015.04.022.
- [100] DWIVEDI S K, ENESPA. *In vitro* cellulase activity of two wilt causing soil fusaria (*Fusarium solani* and *F. oxysporum* f. sp. *lycopersici*) and efficacy of some pesticides against the said fusaria[J]. 2015, 17(1): 58-65. DOI:10.37855/jah.2015.v17i01.12.
- [101] SALAMEH M, WIEGEL J. Lipases from extremophiles and potential for industrial applications[J]. Advances in Applied Microbiology, 2007, 61: 253-283. DOI:10.1016/S0065-2164(06)61007-1.
- [102] PHULPOTO I A, YU Z S, HU B W, et al. Production and characterization of surfactin-like biosurfactant produced by novel strain *Bacillus nealsonii* S2MT and its potential for oil contaminated soil remediation[J]. Microbial Cell Factories, 2020, 19(1): 145. DOI:10.1186/s12934-020-01402-4.
- [103] SKOCZINSKI P, VOLKENBORN K, FULTON A, et al. Contribution of single amino acid and codon substitutions to the production and secretion of a lipase by *Bacillus subtilis*[J]. Microbial Cell Factories, 2017, 16(1): 1-13. DOI:10.1186/s12934-017-0772-z.
- [104] 王卫飞. 酶法甘油解合成甘油二酯工艺的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- [105] ZHONG N J, CHEN W L, LIU L Y, et al. Immobilization of *Rhizomucor miehei* lipase onto the organic functionalized SBA-15: their enzymatic properties and glycerolysis efficiencies for diacylglycerols production[J]. Food Chemistry, 2019, 271: 739-746. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.07.185.
- [106] YAMANE T, KANG S T, KAWAHARA K, et al. High-yield diacylglycerol formation by solid-phase enzymatic glycerolysis of hydrogenated beef tallow[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 1994, 71(3): 339-342. DOI:10.1007/BF02638064.
- [107] KANG S T, YAMANE T. Effects of temperature on diacylglycerol production by enzymatic soli-phase glycerolysis of hydrogenated beef tallow[J]. Korean Journal of Food Science and Technology, 1994, 26(5): 567-572.
- [108] 赵欣欣, 李龙祥, 刘兵, 等. 超声波辅助酶法甘油解制备猪油甘油二酯的研究[C]//第十四届中国肉类科技大会论文集, 2016: 1-8.
- [109] CHEONG L Z, ZHANG H, XU Y, et al. Physical characterization of lard partial acylglycerols and their effects on melting and crystallization properties of blends with rapeseed oil[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57(11): 5020-5027. DOI:10.1021/jf900665h.
- [110] 万倪彤, 王志耕, 梅林, 等. 酶法改性1,3-甘油二酯猪脂肪过程中脂质的分解氧化[J]. 中国粮油学报, 2018, 33(1): 92-96; 101. DOI:10.3969/j.issn.1003-0174.2018.01.016.
- [111] 王宝维, 韩海娜, 葛文华, 等. 酶解法催化鹅油制备甘油二酯[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(3): 80-84.
- [112] 王宝维, 贺可琳, 葛文华, 等. 一种制备鸭油甘油二酯的方法: CN105506013A[P/OL]. 2016-04-20[2023-01-13]. <https://d.wanfangdata.com.cn/patent/CN105506013A>[P/OL]. 2016-04-20[2023-01-13].
- [113] 韩海娜. 鹅油制备甘油二酯微胶囊工艺与功能研究[D]. 青岛: 青岛农业大学, 2014: 9-17.
- [114] 孙敏甜. 酶法制备甘油二酯的研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2013: 18-29.
- [115] 曲可心, 高青山, 姚辉耀, 等. 延黄牛脂制备高纯度1,3-甘油二酯工艺[J]. 食品与机械, 2022, 38(2): 210-215; 227. DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2022.02.035.
- [116] DIAO X Q, GUAN H N, KONG B H, et al. Preparation of diacylglycerol from lard by enzymatic glycerolysis and its compositional characteristics[J]. Korean Journal for Food Science of Animal Resources, 2017, 37(6): 813-822. DOI:10.5851/kosfa.2017.37.6.813.
- [117] 毕艳兰. 油脂化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 10-14.