

刘建辉, 李胜利, 金鹿, 等. 微藻在畜禽饲料中应用研究进展[J]. 江苏农业学报, 2023, 39(9): 1961-1968.  
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2023.09.018

## 微藻在畜禽饲料中应用研究进展

刘建辉<sup>1</sup>, 李胜利<sup>2</sup>, 金鹿<sup>2</sup>, 张春华<sup>2</sup>, 张崇志<sup>2</sup>, 高瑞玲<sup>2</sup>, 赫晓娜<sup>2</sup>, 李庆丰<sup>1</sup>, 孙海洲<sup>2</sup>  
(1. 内蒙古农业大学动物科学学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 2. 内蒙古自治区农牧业科学院动物营养与饲料研究所, 内蒙古 呼和浩特 010031)

**摘要:** 基于中国目前饲料资源尤其是蛋白质饲料短缺的现状, 开发非常规饲料促进豆粕和玉米减量成为近年来研究热点。微藻因富含蛋白质、碳水化合物、脂肪、矿物质和维生素等多种营养物质, 可解决部分饲料资源短缺问题, 并具有规模化生产的潜力。本文综述了微藻的营养特性, 作为饲料对畜禽生产性能及畜禽产品品质的影响, 调控动物机体生理功能的作用机制, 以及其实现规模化应用对环境及经济等诸多方面的限制因素。同时提出了下一步研究展望, 为新型微藻饲料资源开发利用提供参考。

**关键词:** 微藻; 饲料; 畜禽生长; 畜禽产品

**中图分类号:** S816      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4440(2023)09-1961-08

## Research progress on the application of microalgae in livestock and poultry feed

LIU Jian-hui<sup>1</sup>, LI Sheng-li<sup>2</sup>, JIN Lu<sup>2</sup>, ZHANG Chun-hua<sup>2</sup>, ZHANG Chong-zhi<sup>2</sup>, GAO Rui-ling<sup>2</sup>, HE Xiao-na<sup>2</sup>, LI Qing-feng<sup>1</sup>, SUN Hai-zhou<sup>2</sup>

(1. College of Animal Science, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. Institute of Animal Nutrition and Feed, Inner Mongolia Academy of Agricultural & Animal Husbandry Sciences, Hohhot 010031, China)

**Abstract:** Based on the current shortage of feed resources in China, especially the shortage of protein feed, the development of unconventional feed to promote the reduction of soymeal and corn has become a research hotspot in recent years. Microalgae are rich in proteins, carbohydrates, fats, minerals, vitamins and other nutrients, which can solve the shortage of some feed resources and have the potential for large-scale production. In this paper, the nutritional characteristics of microalgae, the effects of microalgae as feed on production performance and product quality of livestock and poultry, the mechanism of regulating the physiological function of animal body, and the limiting factors of its large-scale application in many aspects such as environment and economy were reviewed. And the next research prospect was put forward, aiming to provide reference

for the development and utilization of new microalgae feed resources.

**Key words:** microalgae; feed; livestock and poultry growing; livestock and poultry products

收稿日期: 2022-12-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(M2142006); 鄂尔多斯市绒山羊良种选育和产业创新发展示范项目(KJXM-EEDS-2020002)

作者简介: 刘建辉(1999-), 男, 内蒙古赤峰人, 硕士研究生, 主要从事反刍动物营养研究。(E-mail) 2216730790@qq.com。李胜利为共同第一作者。

通讯作者: 孙海洲, (E-mail) sunhaizhou@china.com

动物饲料占畜禽生产成本的60%, 因此, 需要寻找高质量低成本的非常规原料来补充传统原料的不足, 以满足养殖业日益增长的饲料需求。微藻中

含有碳水化合物、必需脂肪酸、氨基酸、类胡萝卜素和维生素等多种营养成分,可开发用于中国家畜、家禽和水产的养殖饲料<sup>[1]</sup>。到目前为止,人们已经发现了 $3 \times 10^4 \sim 4 \times 10^4$ 种微藻<sup>[2]</sup>,预计未来还会发现更多种类微藻并应用于饲料产业。微藻饲料的研究热度与日俱增,如日本、菲律宾和韩国等国家已使用微藻作为饲料添加剂<sup>[3]</sup>。然而,微藻用于家畜、家禽等动物饲料,在生产的持续性和经济性方面还存在一定问题。本文综述了微藻在家禽和家畜饲料中的应用价值,特别是几种常用微藻的营养价值,并讨论了微藻作为饲料的局限性,为大规模研发微藻饲料提供依据。

## 1 微藻及其营养特性

### 1.1 微藻

微藻是一种能够光合作用的单细胞微生物,吸收 $\text{CO}_2$ 和光能,产生蛋白质、碳水化合物、脂类以及丰富的生物活性物质,如维生素、细胞色素(类胡萝卜素)等<sup>[1]</sup>。微藻含有大量高营养价值和医药价值的碳水化合物,如小球藻(*Chlorella vulgaris*)中含有能够降低血液中胆固醇水平且具有抗氧化特性的 $\beta$ -1-3-葡聚糖<sup>[4]</sup>。另外,根据微藻菌株种类和培养条件的不同,微藻可以产生高达干质量50%(质量分数)的二十碳五烯酸(EPA)、 $\alpha$ -亚麻酸(ALA)、花生四烯酸(ARA)、二十二碳六烯酸(DHA)和亚油酸(LA)等多种多不饱和脂肪酸的脂类<sup>[5]</sup>。

此外,微藻中含有硫胺素(B1)、维生素C(抗坏血酸)、维生素E(生育酚)等多种动物生长发育所必需的维生素以及200多种类胡萝卜素和多种矿物质(如钠、钾、钙、镁、铁和锌等)。其中,多种类胡萝卜素中, $\beta$ -胡萝卜素和虾青素是商业化生产中应用最多的<sup>[6]</sup>。研究表明,杜氏盐藻(*Dunaliella salina*)在高盐、低氮和高光照度等极端条件下,可产生高达干物质质量14%的 $\beta$ -胡萝卜素<sup>[7]</sup>,雨生红球藻(*Haematococcus pluvialis*)在高压条件下可产生高达干物质质量4%~5%的虾青素,虾青素包括游离、单酯和双酯等多种形式<sup>[8]</sup>。并且微藻中自身合成的维生素以及积累的天然形式的类胡萝卜素和矿物质,比人工合成的更容易被动物吸收。

微藻因其蛋白质的必需氨基酸组成与大豆等

优质植物蛋白质的必需氨基酸组成非常相似<sup>[9]</sup>,是一种具有广阔应用前景的蛋白质饲料替代品。同时,其所含营养物质不仅能为动物提供丰富的营养,而且还可以提高动物的自身免疫及抗氧化能力,在养殖生产中可以减少抗生素的使用,最终增加经济效益<sup>[10]</sup>。

### 1.2 微藻调控动物机体生理功能的作用机制

如图1所示,微藻中生物活性成分能够有效抑制脂多糖(LPS)诱导的诱导型一氧化氮合酶(*iNOS*)和环氧化酶-2(*COX-2*)蛋白表达,并抑制炎症及肿瘤坏死因子,通过调节丝裂原活化蛋白激酶(*MAPK*)和核因子 $\kappa$ B(Nuclear transcription factor- $\kappa$ B, *NF- $\kappa$ B*)信号通路改善胃肠道屏障功能,提高机体抗氧化能力。同时,微藻中生物活性成分可以促进乳杆菌及双歧杆菌等有益菌的生长,抑制大肠杆菌等有害菌的增殖,调节胃肠道菌群。微藻还可以显著提高肝脏超氧化物歧化酶、谷胱甘肽水平,降低丙二醛、谷丙转氨酶水平,以减轻巨噬细胞的损伤程度,提高机体肝脏抗氧化功能<sup>[11]</sup>。微藻中含有的多不饱和脂肪酸(Polyunsaturated fatty acid, PUFA)通过胃肠道消化后进入血液,最后通过主动、被动运输方式进入肌肉或乳腺细胞,沉积到肉、蛋、奶等畜禽产品中,有助于改善畜禽产品品质,提升商品价值<sup>[12]</sup>。

## 2 微藻作为动物饲料的应用效果

微藻中富含不饱和脂肪酸、类胡萝卜素和必需氨基酸等多种营养物质,可用作饲料添加剂<sup>[13]</sup>。研究表明,微藻作为饲料添加剂具有改善畜禽肉品质、提升蛋品质、提高牛奶品质和产量,通过抗病毒和抗菌作用提高免疫能力,丰富益生菌的定殖改善肠道功能以及提高饲料转化率等多种作用<sup>[14-15]</sup>。而且, $\omega$ -3脂肪酸( $\omega$ -3 FAs)是一种必需脂肪酸,人体和畜禽都无法自身合成,必须通过饮食来获取。同时,包括ALA、EPA和DHA在内的多种多不饱和脂肪酸的益处已得到充分证明,富含 $\omega$ -3多不饱和脂肪酸的食物具有抗癌、抗氧化和抗病毒等功能<sup>[16]</sup>,有益于身体健康,且具有很高的商业价值。

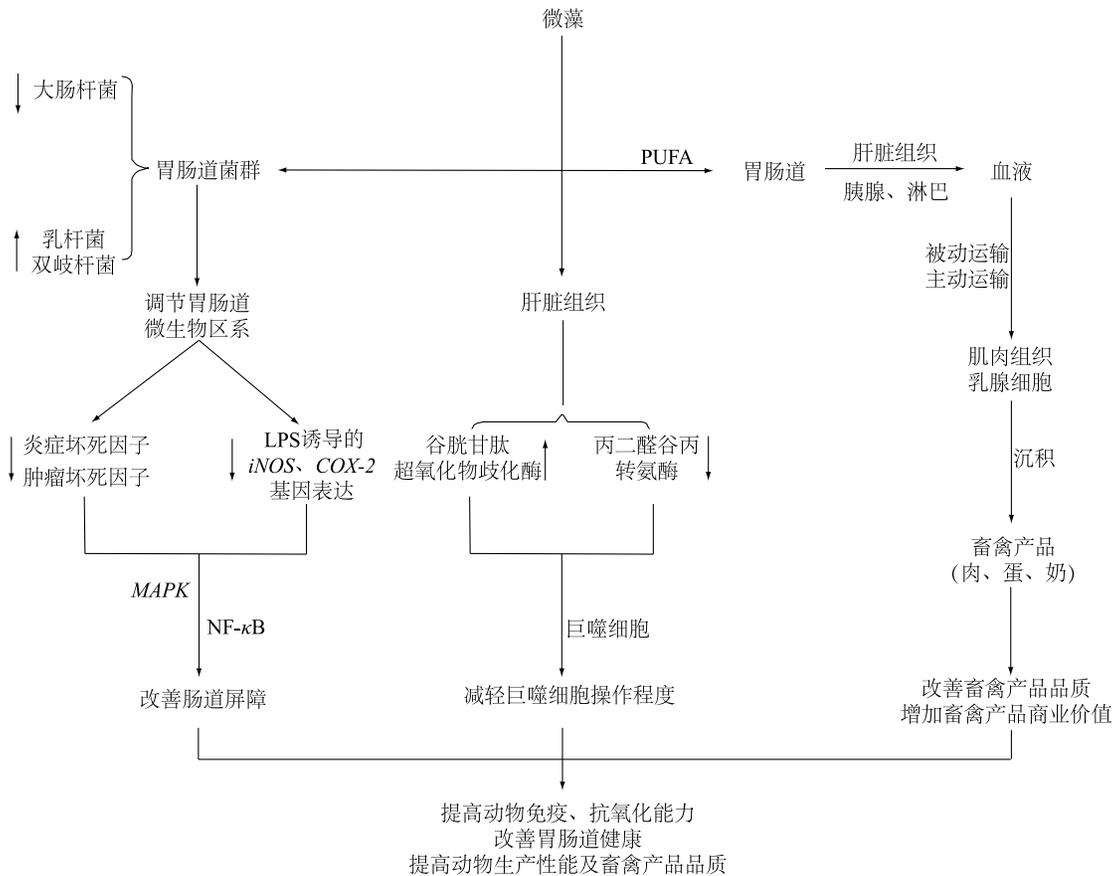
可使用光生物反应器和开放池塘大规模生产微藻,加工后可作为鸡、猪、羊等多种动物的饲料。微藻的培养及生产过程符合环境友好、可持续发

展理念。

### 2.1 微藻对家禽生产性能、禽产品品质的影响

饮食中关于多不饱和脂肪酸(PUFA)作用的研究较多,微藻中 $\omega$ -3脂肪酸的含量较高,可作为饲料以提高畜禽产品的营养价值,目前已有富含PUFA鸡蛋生产<sup>[17]</sup>。研究表明,将富含二十碳五烯酸、二十二碳五烯酸和二十二碳六烯酸的

长链 $\omega$ -3脂肪酸的微藻添加到蛋鸡日粮中,会使这些 $\omega$ -3脂肪酸在蛋黄中富集,且对鸡蛋的品质以及蛋鸡的生产性能没有不良影响<sup>[18]</sup>。因此,与饲喂常规饲料的蛋鸡生产的鸡蛋相比,饲喂富含 $\omega$ -3脂肪酸的混合藻类饲料蛋鸡的鸡蛋中含有更多有益的脂肪酸。



↑表示上调, ↓表示下调;PUFA:多不饱和脂肪酸;iNOS:诱导型一氧化氮合成酶;COX-2:环氧化酶-2;NF-κB:核转录因子;MAPK:丝裂原活化蛋白激酶。

图1 微藻调控动物机体功能的作用机制<sup>[9-10]</sup>

Fig.1 The mechanism of microalgae regulating animal body functions

有研究表明,饲料中添加极少量的微藻就可以显著改变鸡蛋中 $\omega$ -3 FA的含量。Herber等<sup>[19]</sup>以及Moran等<sup>[20]</sup>发现,母鸡饲喂含2.4%藻类的混合饲料,从微藻到鸡蛋的DHA转化效率为42.6%,与对照组的鸡蛋相比,饲喂藻类饲料的鸡蛋中DHA含量增加了6倍;同样,蛋鸡的日粮中添加4.8%微藻,每枚鸡蛋富含196 mg的DHA。而含有高含量EPA和微量DHA的微藻原料(如微绿球藻)倾向于

产生EPA含量低而DHA含量高的鸡蛋,这可能与EPA到DHA的脂肪酸链延长有关,或者DHA比EPA更有利于生物转化。富含 $\omega$ -3 FA的微藻饲料可使蛋黄中胆固醇水平以及 $\omega$ -6 FA含量与 $\omega$ -3 FA含量的比例降低,且对禽类的机体健康和生产性能没有不良影响<sup>[17]</sup>。

人工合成类胡萝卜素(如加丽素)和天然类胡萝卜素都可以显著增加鸡蛋质量并提高饲料转化

率。研究发现,在饲料中添加小球藻,其天然存在的叶黄素可以有效地吸收,并明显增加蛋黄脂质的氧化稳定性<sup>[21]</sup>。Fredriksson等<sup>[22]</sup>在母鸡的饲料中添加20%微绿球藻,试验28d后发现每枚鸡蛋中的叶黄素和玉米黄质含量提高到1.3mg。虽然富含类胡萝卜素的饲料可以改善蛋壳厚度等物理性质,但饲料中类胡萝卜素含量过高会导致蛋黄呈现深橙色至红色<sup>[6,23]</sup>。

就禽肉而言,研究结果表明,在家禽饲料中添加微藻,对肉鸡的生长性能没有任何影响,但会导致肌肉、皮肤、脂肪和肝脏变黄,而且颜色会随微藻添加量的增加而加深,而人们普遍认为颜色深的鸡肉品质更好,所以这也增加了鸡肉的商品价值<sup>[14,24]</sup>。Kang等<sup>[25]</sup>用新鲜的液态海藻(1%)补充家禽饲料,结果表明可以增加肉鸡质量,增加产肉量,提升肉品质。另外,用生物燃料生产中获得的脱脂小球藻和节旋藻作为饲料饲喂家禽,同样会对肉质产生积极影响<sup>[26]</sup>。

## 2.2 微藻对反刍动物生产性能、畜产品品质的影响

反刍动物日粮以富含亚油酸和 $\alpha$ -亚麻酸的谷物或草料为基础,但如果饲料原料未受保护(即未包被),则大部分的多不饱和脂肪酸在瘤胃中就会被生物氢化<sup>[27]</sup>。反刍动物日粮中的不饱和脂肪酸在瘤胃内经氢化作用,会转变为饱和脂肪酸,再进入小肠后被消化吸收。另外,瘤胃发酵所产生的大量挥发性脂肪酸(VFA)经微生物吸收合成产生的高级脂肪酸也多属于饱和性质。大约70%~95%的LA和85%~100%的ALA在离开瘤胃之前会被生物氢化,所以反刍动物的肉中多不饱和脂肪酸含量很低<sup>[28-29]</sup>。

目前,在畜牧养殖业中采用在饲料中添加鱼油、海洋微藻等来提高肉中EPA和DHA等PUFA含量。多项研究结果表明,微藻类添加剂可有效提高动物肉中EPA和DHA的含量。如徐晨晨<sup>[30]</sup>研究结果表明,使用富含DHA的微藻添加到牦牛的日粮中,可以改善牦牛肉质,使肉中ALA含量增加1倍,EPA和DHA含量分别增加2倍和3倍。

最近研究结果证明,在奶牛养殖及牛奶生产方面,微藻是与豆粕相媲美的蛋白质饲料<sup>[9]</sup>,因此使用微藻作为奶牛饲料的研究逐渐增加。微藻对奶牛的泌乳性能以及营养物质向牛奶中转移的影响,在很大程度上取决于奶牛自身的生物合成能力<sup>[31]</sup>。

有研究结果表明,奶牛日粮中添加微藻,可使牛奶中DHA含量增加4倍<sup>[32]</sup>。此外,苏峰祥等<sup>[33]</sup>研究结果表明,奶牛日粮中添加微藻粉可明显增加乳脂中二十二碳五烯酸、二十二碳六烯酸、花生四烯酸和油酸(C18:1)的含量。奶牛养殖生产中常在饲料中添加裂壶藻(*Schizochytrium* sp.)和微绿球藻,以提高牛奶中有益脂肪酸的含量,而且研究发现在哺乳期间喂食富含 $\omega$ -3 FA的日粮,可减少前列腺素分泌,从而提高动物的生育能力和胚胎存活率<sup>[34]</sup>。此外,在饲料中添加5%~10%的微藻,可提高动物肉和奶中铁、碘、钾和锌等矿物质含量<sup>[35]</sup>。

尽管富含 $\omega$ -3 FA的牛奶中ARA、EPA和DHA含量增加,但不会影响牛奶的氧化稳定性<sup>[32]</sup>。奶牛在日粮中所摄取的脂肪酸类型和丰富程度对牛奶品质有很大的影响,因此必须防止瘤胃内的生物氢化,建议使用包被的微藻以保护其含有的营养物质,使更多的 $\omega$ -3 FA被小肠吸收,然后转移到乳腺。

## 2.3 微藻作为益生元对畜禽的影响

益生元通过增强免疫系统防止病原体侵入体内,从而增强动物的免疫能力,使动物保持健康状态。具有益生元特性的最有前景的饲料成分是多糖类及其衍生物(如膳食纤维)<sup>[36]</sup>。

目前,大量具有益生元效应的微藻被用于饲料行业。如小球藻可产生一种含有鼠李糖(52%)、阿拉伯糖和半乳糖的酸性多糖,该复合物具有免疫刺激特性,可通过抑制有害病原体的增殖调节免疫性能,维持机体健康<sup>[37]</sup>。同样,四片藻的细胞壁也由酸性多糖(82% DW)组成,有利于肠道微生物菌群平衡<sup>[38]</sup>。研究结果表明杜氏盐藻产生的细胞外多糖也具有免疫刺激、抗病毒和抗肿瘤的特性<sup>[39]</sup>。

因此,微藻不仅可以直接提供营养物质来改善动物的健康和生产性能,而且还可以通过改善肠道微生物区系间接地使动物受益,从而提高动物的健康水平。

## 3 生产微藻类饲料面临的挑战

### 3.1 使用微藻类原料的局限性

目前,寻找营养素和添加剂以提升畜禽产品的抗氧化性来增加其经济价值是畜禽养殖业及饲料行业需要解决的难题。在猪日粮中添加富含n-

3 PUFA 的饲料会对猪肉的感官指标、风味以及脂质氧化的速度和程度产生一定影响<sup>[40]</sup>。Shingfield 等<sup>[41]</sup>发现,畜禽产品中 PUFA 累积除了会增加氧化风险外,还会影响肉类和牛奶的风味。Lee 等<sup>[42]</sup>发现,肉类中 PUFA 含量增加,会加剧其脂质氧化并影响风味。此外,有研究表明,富含 PUFA 的牛奶和乳制品更容易氧化,最终可能对牛奶质量产生影响<sup>[43]</sup>。但可以通过使用抗氧化剂(如生育酚和类胡萝卜素)来减缓牛奶氧化速度,从而提高牛奶的品质。研究表明,可以通过在饲料中添加抗氧化组合剂,例如自由基猝灭剂、螯合剂(如柠檬酸钠)或还原剂(如异抗坏血酸钠),最大限度地减缓脂质氧化,增强多不饱和脂肪酸的吸收,使其便于融入肉组织,同时保持肉的颜色,并在储存期间保持 PUFA 的含量,以保持或提升肉品质<sup>[42]</sup>。

饲料中添加微藻可以为动物提供必要的营养物质如 PUFA、类胡萝卜素,可以在丰富产品风味的同时提升保存时间。然而,因不同种类的微藻在代谢成分、蛋白质降解性和细胞壁组成方面存在一定差异,选择不同种类的微藻用于生产饲料可能对动物的生产性能有不同的影响<sup>[44]</sup>。并且,微藻的可消化率受细胞壁中纤维含量、不同品种和培养条件下的多糖含量、可与氨基酸反应形成不溶化合物的酚类化合物含量等因素影响<sup>[45]</sup>;同时,确定日粮中添加微藻的剂量范围也很重要。如 Evans 等<sup>[46]</sup>发现,在家禽日粮中添加不同比例(6%~21%)的节旋藻,日粮中微藻含量达到 16% 时,导致半胱氨酸和赖氨酸的消化率升高,才观察到对家禽肉质有积极影响,这可能是由于日粮中添加的大部分微藻的消化率低。最近,已有学者对 12 种微藻进行了生化组成和体外消化率的研究,研究表明,蛋白质含量在 50%~65% 之间的节旋藻和小球藻的消化率最高。富含纤维和脂质的周氏扁藻(*Tetraselmis*)的消化率最低,可能是由于细胞壁或胞外多糖限制了消化酶的作用<sup>[47]</sup>。此外,Moheimani 等<sup>[48]</sup>通过体外试验分析,证明了微藻在研磨、研磨+珠磨、研磨+珠磨+脱脂 3 种不同的加工处理方式下的消化率相似。

### 3.2 微藻规模生产的经济可行性

微藻由于其高生产率可作为生产能源及其他产品的一种可再生资源,而且其可以使用低质量

的水塘来养殖,不需要占用耕地。即便如此,微藻的收获、加工等成本还是比其他常规原料更高。因此,需要优化培养和收获系统,同时改进微藻的加工方法,提高从微藻中获取有价值化合物的经济可行性。

目前,中国市场上微藻每年生产量近  $5 \times 10^3$  t, 每 1 t 的生产成本约为  $2.5 \times 10^4$  美元<sup>[49]</sup>,其中回收成本占总生产成本的 20%~30%。由于微藻细胞的大小不一,直径为 3~60  $\mu\text{m}$ ,所以收获具有一定挑战性<sup>[50]</sup>。微藻收获通常使用离心法、过滤法或重力沉降法进行脱水和浓缩,并且每个过程都有不同的能源需求。这些过程之前可能会使用苛性钠或絮凝剂(例如明矾,氢氧化镁等)进行沉淀预浓缩,便于随后的脱水<sup>[51]</sup>。然而,事实证明,化学絮凝剂会影响藻类的加工(脂质提取),影响最终产品的质量<sup>[52]</sup>。收获难点还在于没有一种收获方法可以适用于所有类型的微藻,必须根据经验确定每种藻株的收获方式,而且还要考虑在应用时的影响因素。

据报道,2021 年全球微藻市场销售额达到了  $2.8 \times 10^8$  美元,预计 2028 年将达到  $4.1 \times 10^8$  美元<sup>[53]</sup>。目前中国微藻年产量为  $1 \times 10^4$  t 干粉,其中 80% 为螺旋藻,10% 为小球藻,8% 为雨生红球藻,2% 为盐生杜氏藻。这些微藻被加工生产成多种产品,用于制药、畜禽饲料、水产养殖、人类食品和食品添加(着色物质和抗氧化剂)等多种行业,如小球藻和栅藻等微藻产生的多种天然功能成分(如叶黄素、类胡萝卜素等)可用作抗氧化剂和着色剂,并且这类微藻中提取并纯化的产品的商业价值明显高于未加工的微藻。微藻中提取纯化的叶黄素的全球市场销售额到 2021 年达到  $1.6 \times 10^8$  美元<sup>[54]</sup>;2021 年类胡萝卜素的市場销售额达到  $7.4 \times 10^9$  元,预计 2028 年将达到  $9.4 \times 10^9$  元<sup>[55]</sup>。

尽管目前微藻的生产能力与市场需求仍然存在差距,但微藻供应世界市场的潜力非常大。微藻生产成本高的特点使其在饲料行业没有竞争力,但由于技术发展和不同的政策干预措施(如激励措施和碳税),其作为畜禽饲料的使用率会越来越高,生产规模也会逐步扩大。

从可持续发展的角度来看,微藻可以用于工业化饲料生产。微藻可以在不同的系统中培养,生产饲料用微藻最适宜用工业生物反应器和露天

池塘<sup>[56]</sup>。Trivedi等<sup>[57]</sup>发现,可以用废水(如来自鱼类加工行业的废水)来培养生产微藻,例如,小球藻可以在未经处理的工业废水中有效培养且不需要添加营养物质,而且最终生产的微藻产品不含有病原体和毒素,可以作为饲料使用。此外,利用大气中CO<sub>2</sub>来培养生产微藻,不仅可以提高微藻的产量,而且有益于环境减碳。由此来看,微藻的生产不仅不会污染环境,还有可能改善环境,符合可持续发展理念。尽管规模化生产微藻有诸多益处,但根据现有的理论知识和生产设施,微藻产品的开发和使用的技术和经济方面仍然面临一些困难。

## 4 展望

微藻在动物饲料中有巨大应用潜力,其含有氨基酸、多不饱和脂肪酸以及类胡萝卜素和维生素等多种生物活性物质,作为动物饲料具有可持续性,可提高畜禽产品的品质。尽管微藻类物质被认为是豆粕等蛋白质饲料最合适的替代品,但其作为动物饲料利用仍存在一些困难。在动物体内的消化率和适宜的饲喂剂量是利用微藻作为动物饲料应解决的难题;此外,由于其生产成本低、生产工艺复杂,大规模生产应用微藻饲料具有经济成本压力,需要探索更加经济实惠的微藻原料生产工艺。近年来市场对于微藻饲料的需求不断增长,因此应优化改进其培养方式,使其生产方式更加经济高效,从而更加广泛应用于动物饲料生产。

### 参考文献:

- [1] 韦良开,李瑞,陈凤鸣,等. 微藻的营养特性及其在畜牧业中应用的研究进展[J]. 动物营养学报,2019,31(3):1044-1052.
- [2] KUMAR A, ERGAS S, YUAN X, et al. Enhanced CO<sub>2</sub> fixation and biofuel production via microalgae: recent developments and future directions[J]. Trends Biotechnol, 2010, 7(28):371-380.
- [3] CHEN J, WANG Y, BENEMANN J R, et al. Microalgal industry in China: challenges and prospects[J]. Journal of Applied Phycology, 2016, 28(2):715-725.
- [4] GREQUE D, SILVA V, GREQUE D, et al. Biologically active metabolites synthesized by microalgae[J]. Biomed Research International, 2015(30):835761.
- [5] CHACÓN-LEE T L, GONZÁLEZ-MARIÑO G E. Microalgae for 'healthy' foods—possibilities and challenges[J]. Comprehensive Reviews in Food Science & Food Safety, 2010, 9(6):655-675.
- [6] 于雪,张威,吴玉洁,等. 微生物产色素机制及其生物活性[J]. 微生物学报, 2022, 62(4):1231-1246.
- [7] OREN A. A hundred years of Dunaliella research: 1905–2005[J]. Saline Systems, 2005, 1(2):2.
- [8] JANNEL S, CARO Y, BERMUDEZ M, et al. Novel insights into the biotechnological production of haematococcus pluvialis-derived astaxanthin: Advances and key challenges to allow its industrial use as novel food ingredient[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2020, 8(10):789.
- [9] 梁双振. 源于海洋微藻生物活性肽的研究[D]. 福州:福州大学, 2015.
- [10] 和玉丹,邹君彪,袁金锋,等. 海洋微藻在动物营养中的应用前景[J]. 饲料研究, 2007(11):67-69.
- [11] 沈奔,严啊妮,金亚倩,等. 海藻在反刍动物生产中的应用研究进展[J]. 饲料工业, 2022, 43(15):12-15.
- [12] 朱辉权. 饲喂DHA微藻粉对山羊乳品质的影响[D]. 北京:中国农业科学院, 2021.
- [13] 赵杨,陈延金,陈颖洁. 微藻在动物生产中的应用[J]. 畜牧兽医科技信息, 2020(11):194.
- [14] 宣雄智,李文嘉,李绍钰,等. 藻类在猪和鸡养殖生产中的应用研究进展[J]. 中国畜牧兽医, 2019, 46(11):3262-3269.
- [15] 王成强,曹体宏,李宝山,等. 混合微藻替代鱼油对大菱鲆幼鱼生长性能、体组成及肠道部分生化指标的影响[J]. 渔业科学进展, 2022, 43(4):158-170.
- [16] IMEN S, RIHAB R, NABEEL A, et al. Algae-derived bioactive compounds with anti-lung cancer potential[J]. Marine Drugs, 2020, 18(4):197.
- [17] 朱宏,梁克红,李光燃,等. ω-3多不饱和脂肪酸强化鸡蛋研究进展:生产、品质与健康功效[J]. 中国食物与营养, 2022, 28(9):38-43.
- [18] 吴永保,杨凌云,闫海洁,等. 饲料中添加微藻和亚麻籽提高鸡蛋黄中ω-3多不饱和脂肪酸含量对比研究[J]. 动物营养学报, 2015, 27(10):3188-3197.
- [19] HERBER S M, VAN ELSWYK M E. Dietary marine algae promotes efficient deposition of n-3 fatty acids for the production of enriched shell eggs.[J]. Poultry Science, 1996, 75(12):1501-1507.
- [20] MORAN C A, MORLACCHINI M, KEEGAN J D, et al. Increasing theω-3 content of hen's eggs through dietary supplementation with aurantiochytrium limacinum microalgae: effect of inclusion rate on the temporal pattern of docosahexaenoic acid enrichment, efficiency of transfer, and egg characteristics[J]. The Journal of Applied Poultry Research, 2019, 28(2):329-338.
- [21] ENGLMAIEROVÁ M, SKRIVAN M, BUBANCOVÁ I. A comparison of lutein, spray-dried Chlorella, and synthetic carotenoids effects on yolk colour, oxidative stability, and reproductive performance of laying hens[J]. Czech Journal of Animal Science, 2013, 58(9):412-419.
- [22] FREDRIKSSON S, ELWINGER K, PICKOVA J. Fatty acid and carotenoid composition of egg yolk as an effect of microalgae addition to feed formula for laying hens[J]. Food Chemistry, 2006, 99

- (3):530-537.
- [23] LEMAHIEU C, BRUNEEL C, TERMOTE-VERHALLE R, et al. Dynamics of omega-3 long chain polyunsaturated fatty acid incorporation in egg yolk by autotrophic microalgal supplementation[J]. European Journal of Lipid Science & Technology, 2015, 117(9): 1391-1397.
- [24] LUM K K, KIM J, XIN G L. Dual potential of microalgae as a sustainable biofuel feedstock and animal feed[J]. Journal of Animal Science and Biotechnology, 2013, 4(1):53.
- [25] KANG H K, SALIM H M, AKTER N, et al. Effect of various forms of dietary Chlorella supplementation on growth performance, immune characteristics, and intestinal microflora population of broiler chickens[J]. Journal of Applied Poultry Research, 2013, 22(1):100-108.
- [26] SWIATKIEWICZ S, ARCZEWSKA-WLOSEK A, JÓZEFIK D, et al. Application of microalgae biomass in poultry nutrition[J]. World's Poultry Science Journal, 2015, 71(4):663-672.
- [27] SCOTT T W, COOK L J, MILLS S C. Protection of dietary polyunsaturated fatty acids against microbial hydrogenation in ruminants[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 1971, 48(7):358-364.
- [28] 马秀花,扈志强,齐明江,等. 多不饱和脂肪酸组合对滩羊肉品质、血清抗氧化指标及背最长肌共轭亚油酸含量的影响[J]. 动物营养学报, 2022, 34(1):457-466.
- [29] 普宣宣,李秋爽,王敏,等. 不饱和脂肪酸瘤胃微生物氢化与调控奶牛泌乳性能的研究进展[J]. 中国畜牧杂志, 2022, 58(10):8-13.
- [30] 徐晨晨. 富含DHA的微藻对牦牛肉品质及脂质变化影响机制的研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2021.
- [31] ALTOMONTEI, SALARI F, LICITRA R, et al. Use of microalgae in ruminant nutrition and implications on milk quality - a review[J]. Livestock Science, 2018, 214:25-35.
- [32] GLOVER K E, BUDGE S, ROSE M, et al. Effect of feeding fresh forage and marine algae on the fatty acid composition and oxidation of milk and butter[J]. Journal of Dairy Science, 2012, 95(6): 2797-2809.
- [33] 苏峰祥,张延利,刘强,等. 日粮添加微藻粉对奶牛瘤胃发酵及乳脂脂肪酸组成的影响[J]. 山西农业科学, 2021, 49(5): 656-661.
- [34] WULLEPIT N, HOSTENS M, GINNEBERGE C, et al. Influence of a marine algae supplementation on the oxidative status of plasma in dairy cows during the periparturient period[J]. Preventive Veterinary Medicine, 2012, 103(4):298-303.
- [35] CHRISTAKI E, FLOROU-PANERI P, BONOS E. Microalgae: a novel ingredient in nutrition[J]. International Journal of Food Sciences and Nutrition, 2011, 62(8):794-799.
- [36] RAPOSO D J, FILOMENA M, MORAIS D, et al. Emergent sources of prebiotics: seaweeds and microalgae[J]. Mar Drugs, 2016, 14(2):27.
- [37] GUPTA S, GUPTA C, PRAKASH D, et al. Prebiotic efficiency of blue green algae on probiotics microorganisms[J]. Journal of Microbiology & Experimentation, 2017, 4(4). DOI: 10.15406/jmen.2017.04.00120.
- [38] SAS A A, TURKI A J, AFFAN A, et al. The influence of temperature and nutrient concentrations on growth rate, biomass, Chlorophyll-a, and biochemical compositions of *Tetraselmis suecica* (Chlorophyta)[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 880. DOI:10.1088/1755-1315/880/1/012014.
- [39] HAVAS F, KRISPIN S, COHEN M, et al. A Dunaliella salina extract counteracts skin aging under intense solar irradiation thanks to its anti-glycation and anti-inflammatory properties[J]. Journal of Investigative Dermatology, 2021, 141(5):87.
- [40] 谭静,郜俊杰,侯建业,等. 日粮中多不饱和脂肪酸 n-6/n-3 的比例对猪肉食用价值影响的研究进展[J]. 饲料研究, 2015(6):21-24.
- [41] SHINGFIELD K J, AHVENJÄRVI S, TOIVONEN V, et al. Effect of incremental levels of sunflower-seed oil in the diet on ruminal lipid metabolism in lactating cows[J]. British Journal of Nutrition, 2008, 99(5):971-983.
- [42] LEE S, FAUSTMAN C, DJORDJEVIC D, et al. Effect of antioxidants on stabilization of meat products fortified with n-3 fatty acids[J]. Meat Science, 2006, 72(1):18-24.
- [43] 李宁. 短期添加高水平亚麻籽对奶牛生产性能、瘤胃发酵和牛奶品质的影响[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学, 2021.
- [44] 李雨晨. 高产PUFAs微藻的筛选、营养胁迫及其在鸡饲料中应用的研究[D]. 北京:北京化工大学, 2017.
- [45] TIBBETTS S M, PATELAKIS S J J, WHITNEY-LALONDE C G, et al. Nutrient composition and protein quality of microalgae meals produced from the marine prymnesiophyte *Paolova* sp. 459 mass-cultivated in enclosed photobioreactors for potential use in salmonid aquafeeds[J]. Journal of Applied Phycology, 2020, 32(1):299-318.
- [46] EVANS A M, SMITH D L, MORITZ J S. Effects of algae incorporation into broiler starter diet formulations on nutrient digestibility and 3 to 21 d bird performance[J]. The Journal of Applied Poultry Research, 2015, 24(2):206-214.
- [47] NICCOLAI A, VENTURI M, GALLI V, et al. Development of new microalgae-based sourdough 'crostini': functional effects of *Arthrospira platensis* (*Spirulina*) addition[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1):19433.
- [48] MOHEIMANI N R, VADIVELLOO A, AYRE J M, et al. Nutritional profile and *in vitro* digestibility of microalgae grown in anaerobically digested piggery effluent[J]. Algal Research, 2018, 35:362-369.
- [49] KHAN M I, SHIN J H, KIM J D. The promising future of microalgae: current status, challenges, and optimization of a sustainable and renewable industry for biofuels, feed, and other products[J]. Microbial Cell Factories, 2018, 17(1):36.
- [50] 苏绮思,杨黎彬,周雪飞,等. 微藻生物质能源技术进展[J]. 区域治理, 2019(37):54-56.

- [51] DAS P, THAHER M I, HAKIM M A Q M A, et al. A comparative study of the growth of *Tetraselmis* sp. in large scale fixed depth and decreasing depth raceway ponds[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 216:114-120.
- [52] 薛溪发,张红兵,曹豪豪,等. 微藻絮凝采收技术研究进展[J]. *安徽农学通报*, 2021, 27(1):33-36, 67.
- [53] 恒州博智. 2022-2028 全球及中国微藻行业研究及十四五规划分析报告[R]. 北京:恒州博智, 2022.
- [54] 恒州博智. 2022-2028 全球与中国叶黄素市场现状及未来发展趋势[R]. 北京:恒州博智, 2022.
- [55] 恒州博智. 2022-2028 全球及中国类胡萝卜素行业研究及十四五规划分析报告[R]. 北京:恒州博智, 2022.
- [56] DBOWSKI M, ZIELINSKI M, KAZIMIEROWICZ J, et al. Microalgae cultivation technologies as an opportunity for bioenergetic system development—advantages and limitations [J]. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 2020, 12(23):9980.
- [57] TRIVEDI T, JAIN D, MULLA N, et al. Improvement in biomass, lipid production and biodiesel properties of a euryhaline *Chlorella vulgaris* NIOCCV on mixotrophic cultivation in wastewater from a fish processing plant[J]. *Renewable Energy*, 2019, 139:326-335.

(责任编辑:成纾寒)