# 可食用微藻活性成分及其对胃肠道功能调节作用的研究进展

杨雅丹[1]，张林彤[1]，郭小[1,2]，肖甚圣[1,2]，李玉芝[1,2*]，柳鑫[1,2*]
（1.武汉轻工大学食品科学与工程学院，湖北武汉 430023）
（2.农产品加工与转化湖北省重点实验室，湖北武汉 430048）

**摘要：**微藻作为一种重要的生物资源，因其富含多种高价值的生物活性物质，在全球健康饮食趋势中备受学术界和产业界的广泛关注。研究表明，微藻含有丰富的色素蛋白、多不饱和脂肪酸、维生素、类胡萝卜素以及多糖等活性成分，展现出显著的抗氧化、抗炎和免疫调节等生理活性。近年来，微藻及其活性成分在促进胃肠道健康方面的潜在益处得到了广泛关注，尤其是在改善肠道屏障功能、调节肠道微生物群、抑制肠道炎症等方面表现突出。因此，该文系统综述了螺旋藻、小球藻等常见微藻中主要活性成分组成特性，深入分析了这些成分对胃肠道功能改善的作用机制，并探讨了微藻活性成分在预防肠道相关疾病和促进整体健康中的科学价值，为功能性食品和营养补充剂的开发提供理论支持与科学依据。未来，随着提取工艺的改进和作用机制的深入研究，微藻及其活性物质有望在健康领域发挥更为重要的作用。

**关键词：**微藻；活性成分；肠道健康；未来食品
**文章编号：**1673-9078(2026)10-364-375 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.10.0821

# Advances in the Bioactive Components of Edible Microalgae and Their Regulatory Effects on Gastrointestinal Function

**YANG Yadan[1], ZHNAG Lintong[1], GUO Xiao[1,2], XIAO Shensheng[1,2], LI Yuzhi[1,2*], LIU Xin[1,2*]**
(1.College of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)
(2.Hubei Provincial Key Laboratory of Farm Products Processing and Transformation, Wuhan 430048, China)

**Abstract:** Microalgae, as an important biological resource, have garnered increasing attention from both academia and industry in the global trend toward healthy diets due to their abundance in various high-value bioactive compounds. Microalgae are rich in bioactive compounds, including phycobiliproteins, polyunsaturated fatty acids, vitamins, carotenoids, and polysaccharides, and exhibit remarkable antioxidant, anti-inflammatory, and immunomodulatory effects. In recent years, microalgae and their bioactive components have been increasingly recognized for their potential to promote gastrointestinal health by enhancing gut barrier function, modulating the gut microbiota, and suppressing intestinal inflammation. The composition and characteristics of major bioactive components in common microalgae, such as *Spirulina* and *Chlorella*, are systematically reviewed in this paper. Their mechanisms of action in improving gastrointestinal function are comprehensively discussed, along with their potential roles in preventing gut-related diseases and promoting overall health. These findings provide theoretical support and scientific guidance for the development of functional foods and dietary supplements. In the future, with advances in extraction processes and in-depth research into their mechanisms of action, microalgae and their bioactive compounds are expected to play an increasingly important role in health.

**Key words:** microalgae; bioactive components; gut health; future foods

收稿日期：2025-06-14；修回日期：2025-09-11；接受日期：2025-09-16
基金项目：国家重点研发计划青年科学家项目（2022YFF1102500）；中央引导地方科技发展专项项目（2022BGE247）
作者简介：杨雅丹（2005-），女，学士，研究方向：食品营养与安全，E-mail：yyd960113@163.com
通讯作者：李玉芝（1992-），女，博士，讲师，研究方向：食品质量与安全，E-mail：yuzhili_226@163.com；共同通讯作者：柳鑫（1987-），男，博士，教授，研究方向：食品营养与安全，E-mail：liuxinhook@whpu.edu.cn

引文格式：
杨雅丹,张林彤,郭小,等.可食用微藻活性成分及其对胃肠道功能调节作用的研究进展[J].现代食品科技,2026,42(10):364-375.
YANG Yadan, ZHNAG Lintong, GUO Xiao, et al. Advances in the bioactive components of edible microalgae and their regulatory effects on gastrointestinal function [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(10): 364-375.

微藻是一类广泛分布于淡水和海水环境中的单细胞或多细胞光合生物，因其生长速度快、培养成本低、营养价值高等优势而备受关注。这些微型生物不仅能够在多种环境条件下生存和繁衍，还通过光合作用有效固定二氧化碳，减少温室气体排放，并生成丰富的生物质，如蛋白质、多不饱和脂肪酸、维生素和矿物质等营养成分[1]。因此，藻类被认为是应对全球气候变化及人口增长所带来的食物匮乏挑战的可持续生物活性物质之一。近年来，微藻的活性成分，特别是类胡萝卜素、多糖和多不饱和脂肪酸等生物活性成分，因其对胃肠道健康的潜在调节作用而受到广泛关注。研究表明，这些成分已被证实具有抗炎、抗氧化及调节肠道菌群等作用。例如，微藻多糖能够作为益生元，选择性地促进双歧杆菌等有益肠道微生物的生长，同时抑制致病菌的增殖，从而维持肠道微生态平衡；同时可改善肠道屏障功能，有助于预防和治疗胃肠道疾病[2]。微藻中的类胡萝卜素具有抗氧化能力，可有效去除活性氧自由基，减轻氧化应激对肠道粘膜的损伤[3]。因此，深入研究微藻及其活性成分对于揭示其改善胃肠道功能的机制具有重要意义，同时为新型功能性食品和营养补充剂的开发提供理论基础。

该文系统综述了微藻的主要营养成分和生物活性分子，如蛋白质、多不饱和脂肪酸、多糖和类胡萝卜素，重点探讨了其通过促进肠道上皮细胞健康、调节肠道菌群平衡、抑制炎症反应和减轻氧化应激等途径对胃肠道功能产生的积极影响，旨在为微藻作为天然功能性食品和营养补充剂的开发提供科学依据。

## 1 微藻活性成分及对胃肠道功能调节作用

### 1.1 蛋白质

微藻作为一种潜在的蛋白质来源，其显著优势之一在于其高蛋白质含量和均衡的必需氨基酸（Essential Amino Acid, EAA）组成。螺旋藻（*Spirulina*）和小球藻（*Chlorella*）中蛋白质含量通常可达 60 wt.%~70 wt.%，这使其成为高效的蛋白质来源。微藻每公顷每年能够生产约 2.5 至 7.5 吨蛋白质[4]。Sun 等[5]通过碱提酸沉法在优化条件下高效提取蛋白质，所得蛋白质营养丰富，抗营养因子含量低且消化率高，应用前景广阔，展示了其在可持续蛋白质生产中的潜力。常见的微藻蛋白质包括藻蓝蛋白、小球藻蛋白和雨生红球藻蛋白。微藻蛋白不仅蛋白质含量高，其 EAA 组成也符合甚至优于联合国粮食及农业组织 / 世界卫生组织（Food and Agriculture Organization of the United Nations/World Health Organization, FAO/WHO）的推荐标准。EAA 是人体无法自身合成，必须通过饮食获取的氨基酸，鸡蛋蛋白通常被视为高 EAA 含量的参考蛋白[6]。多数微藻物种（如微拟球藻、小球藻和杜氏藻）的 EAA 组成与 FAO/WHO 的推荐模式相当，甚至在某些情况下其 EAA 评分模式接近或优于鸡蛋蛋白。

微藻蛋白及其水解产生的肽类在促进肠道健康方面展现出显著的效果。这些生物活性成分不仅具有营养价值，还具备抗炎、抗氧化等多种功能特性，对于维护肠道微生态平衡、预防和治疗肠道炎症性疾病具有重要意义。例如，藻蓝蛋白可通过抑制促炎细胞因子如肿瘤坏死因子 $\alpha$（Tumor Necrosis Factor-$\alpha$, TNF-$\alpha$）的形成，减少前列腺素 E2 的产生，并抑制环氧化酶-2（Cyclooxygenase-2, COX-2）的表达，从而缓解肠道炎症[4]。2024 年最新研究证实[7]，螺旋藻可以作为替代蛋白质用于功能性饲料添加剂，在肉鸡养殖中展现出显著经济效益。当肉鸡饲料中螺旋藻添加量控制在 5 wt.% 以下时，可以保持或者改善肉鸡的生长性能（包括终末体重、体重增长和饲料转化率），同时改善肠道菌群结构，促进乳酸菌等有益菌增殖而抑制大肠杆菌生长，保护肠道健康。此外，螺旋藻的添加可以改善鸡肉的脂肪酸组成，增加二十碳五烯酸（Eicosapentaenoic Acid, EPA）和二十二碳六烯酸（Docosahexaenoic Acid, DHA）等多不饱和脂肪酸的含量，并可能降低胆固醇和甘油三酯水平。目前，对于微藻蛋白的改性及乳液递送系统等研究[8-10]，进一步拓宽了微藻蛋白在食品和膳食补充剂中的应用领域。总结而言，微藻蛋白的功能效应呈现显著的物种特异性。螺旋藻以蛋白质丰度、脂肪酸调控潜力为核心，实现肠道微生态优化；小球藻聚焦肠道屏障功能修复，依托紧密连接强化与抗菌防御实现双重保护；藻蓝蛋白等特色组分则凭借抗炎、抗氧化活性，成为肠道炎症干预与代谢稳态调节的潜力分子。微藻蛋白的功能分化既受天然异质性影响，也受食品营养强化等多元场景的需求驱动。

### 1.2 微藻多糖

微藻因其能够合成多种高价值分子而备受关注，这些分子包括但不限于蛋白质、生物活性肽、多不饱和脂肪酸、色素、萜类和生物活性多糖等。微藻多糖因其免疫调节、抗肿瘤、抗菌、抗氧化和抗炎等生物活性，在医药、食品、化妆品和饲料等领域具有广阔的应用前景。常见的产多糖微藻包括卟藻属、小球藻属、四藻属、裂藻属和罗德拉属等微藻类群，其中，*Spirulina* 和 *Chlorella* 是两种被广泛研究的微藻[11]。这些多糖不仅可作为保护剂、能量储存物质和结构分子，还表现出显著的免疫增强和病毒抑制活性。例如，螺旋藻多糖、小球藻多糖和盐藻多糖等多种微藻多糖已被证实具有显著的免疫促进作用，有助于提升机体健康[12]。此外，微藻多糖的抑菌、抗氧化及抗肿瘤等特性也使其成为功能性食品和药物开发的潜在候选物。

微藻多糖作为抗生素替代品用于动物饲料中，可提高动物的免疫力和生产性能。研究表明，添加微藻多糖的饲料能够显著增强家禽和家畜的体重增长、饲料转化率和免疫功能[13]。此外，微藻多糖和寡糖成分可以作为益生元，促进肠道有益菌增殖，增强肠道屏障功能[2,14,15]。例如，Wan 等[16]通过体外消化和发酵模拟系统，探究小球藻（*Chlorella zofingiensis*）的胞内多糖（Intracellular Polysaccharide）（CZIP-S3）的消化性、发酵特性及其对肠道微生物群的调节作用。结果发现，CZIP-S3 在上消化道（口腔、胃和小肠）中未被分解，但能被肠道微生物发酵利用并代谢为小分子物质，同时降低发酵液的 pH 值并增加短链脂肪酸（Short-Chain Fatty Acid, SCFAs）的产量。发酵 24 h 后，SCFAs 总浓度显著增加至 40.27 mmol·L$^{-1}$，以乙酸、丙酸和丁酸为主要成分。同时，CZIP-S3 能显著降低肠道微生物中厚壁菌门 / 拟杆菌门的比例，并增加拟杆菌属、双歧杆菌属和阿克曼菌属的相对丰度，证实其具有肠道菌群调节功能[17]。

螺旋藻多糖核心优势体现在免疫激活与抗菌协同，通过 Toll 样受体介导的免疫细胞信号通路调控，维系肠道免疫稳态。小球藻多糖侧重调控肠道微生态，以益生元属性驱动肠道微生物群落结构优化（如厚壁菌门与拟杆菌门比例平衡），激活 SCFAs 代谢网络并强化肠道屏障功能发挥效应。盐藻多糖则通过氧化应激调控缓解肠道炎症，借助 Nrf2 通路介导的活性氧清除、促炎因子表达抑制来实现肠道健康调节。微藻多糖的生物活性也表现出显著的物种异质性。

### 1.3 维生素

微藻含有多种独特维生素，包括在常见植物中较少存在的维生素 D 和维生素 K。以杜氏藻为代表的绿色微藻能够大量积累多种维生素，包括 B 族维生素（$B_2$、$B_{12}$、$B_9$、$B_3$）以及具有抗氧化功能的维生素 C 和 E[18]。其中，螺旋藻因富含维生素 A、E、K 及 B 族维生素（$B_1$、$B_2$、$B_3$、$B_6$ 和 $B_{12}$）而被誉为“超级食物”。具体而言，每 100 克螺旋藻含有 1.4 mg 维生素 C，15~40 mg 维生素 B1，30~50 mg 维生素 $B_2$，0.1~0.2 mg 维生素 $B_{12}$，0.5~1 mg 维生素 $B_6$，以及 5~20 mg 维生素 E[19-22]。值得注意的是，螺旋藻中维生素 $B_{12}$ 的含量与动物性食品相当（0.01~0.02 mg·kg$^{-1}$），这使其成为素食者补充维生素 $B_{12}$ 的优质选择[23]。此外，螺旋藻还是胡萝卜素的优质来源（700~1 700 mg·kg$^{-1}$），该物质在体内能够被生物转化为维生素 A，考虑到人体每日维生素 A 的需求量约为 1 mg，因此摄入 1~2 g 螺旋藻即可满足这一需求[24]。维生素 A 不仅能够满足营养需求，还能作为脂溶性抗氧化剂有效对抗机体氧化应激。

微藻中的维生素对改善肠道健康发挥重要作用。维生素 K 是一类脂溶性维生素，主要包括维生素 K1 和维生素 $K_2$ 等形式。维生素 K 能够有效调节肠道微生物群的组成[25,26]，促进乳酸菌等有益菌增殖，同时抑制大肠杆菌和嗜水气单胞 C 菌等病原菌的生长。这种调节作用直接影响肠道微生物的代谢产物，如 SCFAs 的生成，从而间接维护肠道健康[27]。在抗氧化方面，维生素 K 通过多种机制发挥作用：一方面减少丙二醛（Malondialdehyde, MDA）和蛋白羰基等氧化应激产物的产生，另一方面提升超氧化物歧化酶（Superoxide Dismutase, SOD）、谷胱甘肽过氧化物酶（Glutathione Peroxidase, GSH-Px）等抗氧化酶的活性，这些作用共同减轻肠道细胞的氧化损伤。维生素 D 受体（Vitamin D Receptor, VDR）同样对肠道屏障功能具有影响。Sun 等[28]研究发现肠道屏障由粘液层、上皮细胞和紧密连接（Tight Junction, TJ）以及局部免疫系统共同构成，其中 TJ 蛋白对维持肠道屏障的完整性至关重要。VDR 通过调控肠道上皮细胞中多种 TJ 蛋白的基因表达来维持屏障功能的完整性[29]。研究显示[30]，益生菌可通过与维生素 D/VDR 信号通路的协同作用维持肠道屏障功能。值得注意的是，在炎症性肠病（Inflammatory Bowel Disease, IBD）患者中可观察到维生素 D 及 VDR 水平显著降低，这表明 VDR 信号通路在调控肠道炎症反应和维持屏障功能中具有核心作用。动物实验进一步证实[31]，VDR 基因敲除小鼠会自发发展为结肠炎，证明了 VDR 在肠道炎症预防中的关键作用。

微藻中维生素含量和组成通过作用通路差异引发

效应分化。螺旋藻中维生素 $B_{12}$ 以类咕啉活性型直接调控肠道拟杆菌属叶酸代谢通路，杜氏藻“假维生素 $B_{12}$”则仅通过促丙酸菌增殖间接参与 SCFAs 合成；螺旋藻中维生素 $K_2$ 靶向肠道上皮外源性受体抑制致病菌毒力因子表达，小球藻中维生素 $K_1$ 更侧重通过诱导乳酸菌分泌胞外多糖强化肠道粘液层屏障。效应通路研究为营养干预的精准化实施提供了参考依据。

### 1.4 色素

类胡萝卜素是一类由八个异戊二烯单元构成的四萜类化合物，分为胡萝卜素和叶黄素两大类。作为光合色素的组成部分，类胡萝卜素不仅具有光保护作用，还能够帮助生物体抵抗自由基和强烈的紫外线辐射等环境胁迫[32]。在微藻中，类胡萝卜素通过清除自由基表现出显著的抗氧化活性，从而保护藻类细胞对抗过度的紫外线太阳辐射的负面影响[3]。在常见微藻中，类胡萝卜素的含量差异显著：螺旋藻中的 $\beta$-胡萝卜素含量是胡萝卜中的 10 倍[33]；小球藻中的总色素含量约占干重的 4 wt.% 至 5 wt.%，包括叶绿素 a、叶绿素 b 及类胡萝卜素；杜氏藻属（*Dunaliella*）等藻类能够大量积累类胡萝卜素，$\beta$-胡萝卜素含量可达其藻体干重的 10 wt.% 以上，最高可达 14 wt.%。不同藻类因进化适应差异，演化出独特的色素组合，从而表现出不同的肠道调节功能。螺旋藻以藻蓝蛋白为核心功能色素，具强效自由基清除能力，可增强益生菌（如乳酸杆菌）的胃肠道存活率并抑制致病菌定植[34,35]。小球藻中超高的叶绿素 a 积累，可以强力吸附肠道内毒素，减少氧化应激[36]。杜氏藻在强光胁迫下合成 $\beta$-胡萝卜素，该分子通过下调 NF-$\kappa$B 通路发挥作用[36]。

虾青素是一种酮式类胡萝卜素，目前微藻已成为高价值虾青素的重要生产来源。其中，雨生红球藻具有最高的虾青素蓄积能力，可达细胞干重的 4%~5%。类胡萝卜素对肠道菌群的代谢和组成有一定的调控作用，Rocha 等[37]在体外模拟胃肠道消化和粪便发酵过程中发现，类胡萝卜素样本触发了发酵过程中短链脂肪酸（如琥珀酸、乙酸、丁酸和丙酸）的生成，并且增加了有益细菌（如毛螺菌科 Lachnospiraceae、瘤胃菌科 Ruminococcaceae 和颤螺旋菌科 Oscillospiraceae）的丰度。这些发现表明，类胡萝卜素可通过调节肠道微生物的代谢和组成，发挥潜在的益生作用，从而促进肠道健康。

### 1.5 不饱和脂肪

微藻中的脂质含量通常占其干重的 10 wt.% 至 60 wt.%，富含多种具有重要健康功能的多不饱和脂肪酸（Polyunsaturated Fatty Acid, PUFAs）。微藻的健康价值在很大程度上归因于其所含的 Omega-3 长链多不饱和脂肪酸（Long Chain Polyunsaturated Fatty Acids, LC-PUFAs），包括 EPA 和 DHA。研究表明，这些 Omega-3 LC-PUFAs 对心血管健康、炎症性疾病、神经系统疾病及某些类型的癌症具有显著的预防和改善作用[38]。目前，冷水鱼和其他海洋生物是人类获取 Omega-3 LC-PUFAs 的主要来源。然而，由于过度捕捞导致海洋资源衰退，寻找可持续的替代来源迫在眉睫。在此背景下，富含油脂的微藻展现出巨大潜力，能够有效替代鱼类和海鲜作为 Omega-3 LC-PUFAs 的稳定可持续来源[39]。在生态系统中，LC-PUFAs 通过食物链的传递被动物和人类摄取，因此，微藻不仅能够作为 EPA 和 DHA 等必需脂肪酸的直接来源，还在维持整个食物链的营养平衡中发挥关键作用。

Omega-3 PUFAs（如 DHA、EPA、$\alpha$-亚麻酸）作为人体必须从膳食中获取的脂肪酸，通过与肠道菌群及免疫系统的复杂互作，在维系肠道稳态和促进整体健康中发挥关键作用。在肠道菌群调控方面，Omega-3 PUFAs 通过双重机制发挥作用：一方面直接调节菌群组成，显著增加双歧杆菌和乳酸菌等有益菌的丰度，降低厚壁菌门 / 拟杆菌门（Firmicutes/Bacteroidetes, F/B）比值，并抑制肠杆菌科等条件致病菌增殖；另一方面间接改善肠道微环境，通过促进 SCFAs（如丁酸）的产生，减少脂多糖（Lipopolysaccharide, LPS）等促炎因子的释放，从而改善肠道屏障功能并缓解代谢性内毒素血症[40]。在免疫调节方面，Omega-3 PUFAs 通过多通路协同作用：通过拮抗核因子-$\kappa$B（Nuclear Factor-kappa B, NF-$\kappa$B）和丝裂原活化蛋白激酶（Mitogen-Activated Protein Kinase, MAPK）信号通路，抑制促炎因子（TNF-$\alpha$）和部分白细胞介素（Interleukin, IL）的表达，同时激活过氧化物酶体增殖物激活受体 $\gamma$（Peroxisome Proliferator-Activated Receptor Gamma, PPAR $\gamma$）和 G 蛋白偶联受体 120（G-Protein-Coupled Receptor 120, GPR120）通路以增强抗炎因子（IL-10）的分泌，这种多靶点调控机制使其在炎症性肠病、非酒精性脂肪肝及肠道感染等疾病中展现出显著的抗炎功效。

Omega-6 PUFAs 同样对肠道功能具有显著调节作用。富含 Omega-6 PUFAs 的微藻 *Lobosphaera incisa* 可提高斑马鱼肠道微生物的多样性，显著提高了与花生四烯酸和二高-$\gamma$-亚麻酸代谢相关的基因（如环氧化酶 2、脂氧合酶 1）的表达，增加抗炎症细胞因子 IL-10 的表达[41]。但是，过量摄入 Omega-6 PUFAs 会对小鼠心血管、肠道和代谢产生的负面影响，引起

小鼠肠道菌群失调，细菌过度生长，并伴随肠道炎症[42]。研究表明，补充鱼油（富含 Omega-3 PUFAs）可部分改善这一现象[42]。除此之外，单不饱和脂肪酸 Omega-9 可以促进双歧杆菌、乳酸杆菌等有益菌增殖，抑制有害菌，改善菌群失调。在肠道屏障功能增强方面，通过增加黏液分泌和紧密连接蛋白表达，减少肠道通透性，防止有害物质入血[43]。同时，Omega-9 可以抗炎、蠕动促进，通过抑制炎症因子（如 TNF-$\alpha$、IL-6），减轻肠道炎症；刺激平滑肌收缩，缓解便秘[44]。

值得注意的是，Omega-3 PUFAs 与肠道菌群存在双向互作：特定菌株（如乳酸菌）可将其生物转化为共轭亚油酸等活性代谢物，进一步调节影响宿主脂肪酸利用率及免疫反应[45]。在肥胖、非酒精性脂肪肝等病理状态下，Omega-6/Omega-3 比例失衡会加剧菌群紊乱和和免疫失调，而补充 Omega-3 PUFAs 有助于恢复菌群平衡，改善肠道通透性及系统性低度炎症[16]。不饱和脂肪酸与肠道菌群的作用机制总结如图 1。微藻作为不饱和脂肪酸的可持续来源，具备生长快、生产效率高的优势，在营养与健康领域应用前景广阔。常见的微藻种类及其富含的活性成分和健康作用机制总结见表 1。随着生产技术的革新和产业化规模的扩大，微藻有望成为全球 PUFAs 的重要供给来源，为实现人类健康与生态可持续的双重目标提供解决方案。

## 2 微藻活性成分对肠道功能调节作用现状研究

### 2.1 调节肠道菌群平衡

微生物群在维持宿主健康和内环境稳态中发挥着至关重要的作用。它不仅参与免疫系统发育、营养物质消化吸收和肠屏障功能调节，也在葡萄糖和脂质的代谢调控以及毒素清除等生理过程中扮演重要角色。微藻活性成分能够通过选择性促进有益菌增殖和抑制致病菌生长调节肠道菌群平衡。Ayaka 等[56]深入探讨了细小裸藻（*Euglena gracilis*, *E. gracilis*）对人类肠道微生物群及排便特性的影响，研究发现 *E. gracilis* 中的成分能够显著促进肠道中有益菌群的生长，使平均丰度从对照组的 0.47% 提升至 1.92%。体外实验进一步显示，添加 *E. gracilis* 将丁酸的产量从对照组的 38.65 mmol·L$^{-1}$ 显著提高至 45.13 mmol·L$^{-1}$。有益菌群和丁酸的增加可能改善排便量和排便频率，从而对肠道健康产生积极影响，为开发新型益生元产品提供了理论依据。

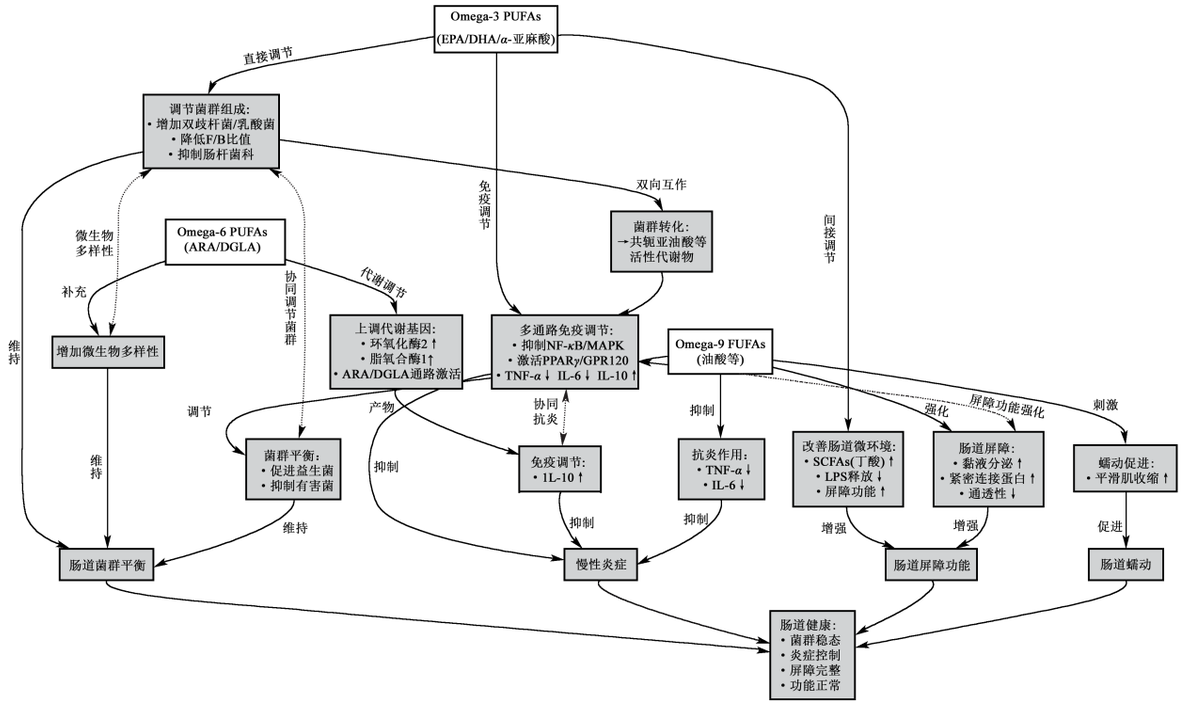



**图 1 不饱和脂肪酸 – 肠道菌群 – 免疫轴多维调控网络机制图**

**Fig.1 Multidimensional regulatory network mechanism for unsaturated fatty acid-gut microbiota-immune axis**

表 1 微藻生物活性成分及其健康潜力

Table 1 The bioactive components of microalgae and their health potential

| 活性成分 | 调节作用机制 | 来源 | 参考文献 |
|---|---|---|---|
| 蛋白质类<br>藻蓝蛋白（天然抗氧化蛋白）、小球藻蛋白、雨生红球藻蛋白（抗氧化肽前体蛋白） | 抑制促炎因子（TNF-*α*, COX-2）、调节肠道菌群（↑乳酸菌，↓大肠杆菌）、改善肠道屏障功能、提高饲料转化率与动物生长性能虾青素是自然界最强抗氧化剂之一，可直接中和过氧自由基（ROO·），阻断脂质过氧化链式反应小分子活性肽（分子量＜1 kDa）可穿透肠上皮，直接清除细胞内 ROS（活性氧） | 螺旋藻（*Spirulina*）<br>小球藻（*Chlorella*）<br>雨生红球藻（*Haematococcus pluvialis*） | [4,46] |
| 维生素类<br>VD、VB、VK | 调节菌群组成（↑乳酸菌，↓病原菌）、促进 SCFAs 代谢、抗氧化作用（↑SOD/GSH-Px，↓MDA）通过 VDR 信号调控紧密连接蛋白（ZO-1 等）、维持肠道屏障完整性、与益生菌协同抗炎、改善 IBD 患者肠道炎症 | 螺旋藻（*Spirulina*）<br>杜氏藻（*Dunaliella*）<br>雨生红球藻（*Haematococcus pluvialis*） | [47,48] |
| 色素类<br>类胡萝卜素（如*β*-胡萝卜素、虾青素、岩藻黄素、伪枝藻素） | 促进有益菌增殖（Lachnospiraceae↑）、增加 SCFAs 产量（丁酸↑）、改善菌群 *α* 多样性、光保护作用减轻氧化应激具有抗氧化、抗癌、抗炎等多种生物活性。显著↓LPS 诱导的小鼠肠道屏障损伤，↓体重减轻、改善肠道通透性，改善肠道形态损伤在胁迫环境下形成，通过↓NF-B 阻断炎症介质表达发挥抗炎活性，抑制多种癌细胞 | 小球藻（*Chlorella*）<br>雨生红球藻（*Haematococcus pluvialis*）<br>杜氏藻（*Dunaliella*）<br>三角褐指藻（*Phaeodactylum tricornutum*）<br>固氮念珠藻（*Nostoc punctiforme PCC*） | [49-51] |
| 不饱和脂肪酸类<br>Omega-3、EPA/DHA | 调节菌群结构（双歧杆菌↑，F/B 比值↓）、抑制 NF-κB/MAPK 炎症通路、增强肠道屏障（↑紧密连接蛋白）、促进抗炎因子 IL-10 分泌、降低 LPS 内毒素 | 杜氏藻（*Dunaliella*）<br>小球藻（*Chlorella*）<br>雨生红球藻（*Haematococcus pluvialis*） | [52,53] |
| 多糖类螺旋藻多糖（酸性多糖）、小球藻多糖（酸性多糖）、盐藻多糖（酸性多糖） | 益生元作用（↑双歧杆菌 / 拟杆菌属）、促进 SCFAs 合成（乙酸 / 丙酸 / 丁酸↑）、调节 F/B 比值（厚壁菌门 / 拟杆菌门↓）、增强肠道免疫应答 | 螺旋藻（*Spirulina*）<br>小球藻（*Chlorella*）<br>盐藻（*Salina algae*） | [54,55] |

注：TNF-*α*：肿瘤坏死因子 *α*（Tumor Necrosis Factor-*α*）；COX-2：环氧化酶 -2（Cyclooxygenase-2，COX-2）；VD：维生素 D（Vitamin D）；VB：维生素 B（Vitamin B）；VK：维生素 K（Vitamin K）；SCFAs：短链脂肪酸（Short-Chain Fatty Acid）；SOD：超氧化物歧化酶（Superoxide Dismutase）；GSH-Px：谷胱甘肽过氧化物酶（Glutathione Peroxidase）；MDA：丙二醛（Malondialdehyde）；VDR：维生素 D 受体（Vitamin D Receptor）；IBD：炎症性肠病（Inflammatory Bowel Disease）；SCFAs：短链脂肪酸（Short-Chain Fatty Acid）；F/B：厚壁菌门 / 拟杆菌门（Firmicutes/Bacteroidetes）；NF-*κ*B/MAPK：炎症通路核因子 - *κ*B（Nuclear Factor-*κ*B，NF-*κ*B）/ 丝裂原活化蛋白激酶（Mitogen-Activated Protein Kinase，MAPK）炎症通路；IL：白细胞介素（Interleukin）；LPS：低脂多糖（Lipopolysaccharide）。

Taylor 等[57]研究了微藻衍生的 *β*-葡聚糖对小鼠肠道微生物菌群结构和功能的影响，结果发现 *β*-葡聚糖干预显著改变了菌群结构，表现为疣微菌门丰度增加和拟杆菌门丰度降低；长期 *β*-葡聚糖干预可增加特定有益菌群（如嗜黏蛋白阿克曼菌和类杆菌）的丰度，促进 SCFAs 产生，从而调节宿主免疫并降低肠道炎症易感性。其中，嗜黏蛋白阿克曼菌是一种黏液降解菌，能够改善高脂饮食诱导的代谢紊乱，被认为是新一代益生菌的候选菌株，而类杆菌是主要的有益肠道微生物，能够代谢膳食多糖产生 SCFAs[58]。不同微藻来源的 *β*-葡聚糖在结构、含量及存在形式上存在显著差异，直接影响其功能。*β*-葡聚糖的结构多样性是决定其生物功能的核心因素。裸藻（如纤细裸藻）*β*-葡聚糖为线性 *β*-1,3- 葡聚糖，无分支链，可通过下调空肠 Toll 样受体 4 和热休克蛋白 90 表达，增强肠道免疫屏障[59]；硅藻（如假微型海链藻、三角褐指藻）的 *β*-葡聚糖以 *β*-1,3- 主链 +*β*-1,6- 支链为特征，需提取纯化释放活性，通过清除自由基发挥作用[60,61]；螺旋藻的 *β*-葡聚糖则为混合型结构（含 *β*-1,3 和 *β*-1,6 随机分支），以胞内多糖复合物形式存在，其生物活性主要依赖藻蓝蛋白的协同作用[62]。

以断奶仔猪为实验对象评估微藻的肠道健康效应，两项独立试验结果表明，微藻补充能显著改善肠道形态结构，提高空肠绒毛高度，并降低腹泻发生率。同时，微藻补充未引起系统性炎症反应的显著影响，证实其良好的安全性[63]。Martins 等[64]进一步研究发现，添加小球藻可调节断奶仔猪肠的肠道菌群结构，显著增加特定益生菌类群（如 *Colidextribacter*、*Oscillospira* 和 *Lactobacillus*）的丰度。其中，乳酸菌（*Lactobacillus*）能有效抑制病原菌定植，而厌氧革兰氏阴性菌（*Oscillospira*）与 SCFAs 的生成密切相关，对维持肠道稳态具有潜在的促进作用。因此，微藻不仅能调节肠道菌群平衡，而且安全性良好，这为开发绿色、高效的动物营养策略提供了科学依据。

## 2.2 代谢产物调节

肠道微生物群对宿主脂质代谢的调控作用已被广泛证实，这一过程在很大程度上依赖于肠道微生物产生的多种代谢物，尤其是 SCFAs。微藻生物活性成分在体外的结肠微生物群发酵过程中可显著促进 SCFAs 的产生，特别是乙酸、丙酸和丁酸的生成[16]。丁酸盐作为结肠上皮细胞的主要能量底物，不仅有助于改善肠道消化功能、促进营养吸收，还能增强肠道免疫反应。此外，SCFAs 在调节结肠细胞基因表达方面发挥了至关重要的作用，这些基因与抗炎反应、肠道屏障功能维持、水电解质平衡和肠道代谢调节密切相关[65]。

Costanza 等[47]以犬类为研究对象，探究三角褐指藻（*Phaeodactylum tricornutum*, PT）对其肠道健康的影响，结果发现 PT 能够增加有益的 SCFAs（如丙酸盐和丁酸盐）的浓度，并降低有害支链脂肪酸水平，可显著改善犬类肠道健康。SCFAs（如乙酸、丙酸和丁酸）对肠道健康有多重益处，包括滋养黏膜、预防结肠癌和增强肠道屏障功能，其中丙酸对黏膜愈合和抗炎作用尤为显著。富含 EPA/ 岩藻黄素（EPA/ Fucoxanthin, EPA/Fx）和 *Chlorella zofingiensis* 的 PT 饮食，可显著增加小鼠粪便中的乙酸和戊酸，其中丙酸仅在最高剂量（25 wt.%）的 EPA/Fx 饮食组中显著增加。表明 PT 饮食在推荐的剂量下对肠道屏障功能是有利的[40]。Delsante 等[47]研究可食用微藻对犬类肠道代谢物的影响，发现在发酵 6 h 后，PT 处理组的丙酸（+36%）和丁酸（+24%）浓度显著增加，24 h 后，丙酸浓度仍维持 21% 的增幅，异戊酸浓度也上升 10%，这些提升浓度的 SCFAs 可通过抗炎、免疫调节及抗癌等机制改善肠道健康。小球藻的胞内多糖 CZIP-S3 也被发现可有效调节肠道代谢[16]。体外发酵显示，CZIP-S3 可被肠道菌群代谢产生 SCFAs，处理组的 SCFAs 总量从初始的 5.80 mmol·$L^{-1}$ 增加到 40.27 mmol·$L^{-1}$，显著高于空白对照组（23.91 mmol·$L^{-1}$），SCFAs 的显著增加表明 CZIP-S3 可能通过促进有益细菌的生长和代谢活动来改善肠道健康。

## 2.3 抗炎与抗菌活性

微藻具有显著的抗氧化、抗菌和抗炎潜力。目前，抗生素常被用作饲料添加剂以促进动物的生长，但长期使用会导致抗生素耐药性问题。Liao 等[66]研究了富含胆绿素（Mesobiliverdin Ix*α*, MBV IX*α*）的微藻作为饲料添加剂，评估其是否代替抗生素并改善断奶仔猪的肠道健康。结果发现，MBV IX*α* 微藻饲料添加剂可以增加绒毛高度和 VH:CD（Villus Height to Crypt Depth Ratio）比值，降低小肠组织中炎症因子 IL-6 和 TNF-*α* 的水平，显著改善断奶仔猪的肠道健康。此外，MBV IX*α* 微藻饲料添加剂在减轻肠道炎症和提高抗氧化能力方面与泰乐菌素相当，表明其可作为抗生素的潜在替代方案。

微藻 *Lobosphaera incisa* P127 在斑马鱼 IBD 模型中表现出明显的肠道炎症缓解作用，以及其对肠道基因表达和肠道微生物组的调控[67]。IBD 是一种慢性肠道炎症性疾病，包括溃疡性结肠炎和克罗恩病。研究采用非饥饿、7.5 wt.% 和 15 wt.% 氮饥饿的 *L. incisa* P127 生物质制备实验饲料，结果发现生物质的膳食摄入明显调节肠道免疫和炎症基因表达，其中 15 wt.% 氮饥饿生物质通过上调肠道相关基因（如 NOD2、COX1、IL8 等）的表达发挥调控作用，这些基因的上调可能与免疫细胞（如中性粒细胞和巨噬细胞）的激活有关，从而显著缓解 2,4,6- 三硝基苯磺酸（2,4,6-Trinitrobenzenesulfonic Acid, TNBS）诱导的肠道炎症。Zhou 等[68]使用渐进式分层提取模型获得三种微藻中的生物活性成分，发现提取物对食源性病原菌（如沙门氏菌、大肠杆菌、金黄色葡萄球菌和单核细胞增生李斯特菌）具有抑制作用，同时能促进某些益生菌（如乳酸杆菌和双歧杆菌）的生长；深入分析发现其通过抑制 TNF-*α* 诱导的 NF-*κ*B 通路激活表现出抗炎活性。

## 2.4 调节肠道屏障功能

肠道屏障是维持肠道健康的第一道防线，由肠道上皮细胞、紧密连接蛋白、黏液层和免疫细胞等组成，其主要功能是阻止有害物质（如细菌、毒素和未消化的抗原）从肠道进入体内。小球藻（*Chlorella vulgaris*, CV）可以通过增强闭合蛋白和抗菌肽的表达，显著改善肠道屏障功能，从而为肠道健康提供保护[69]。研究表明，CV 补充显著提升肠道组织中闭合蛋白基因的 mRNA 表达水平，该蛋白是肠道上皮细胞间紧密连接的主要成分，能够调节细胞间的通透性形成物理屏障，有效阻隔病原体和有害物质的跨细胞迁移[70]；同时，CV 补充组的抗菌肽（禽 *β*-防御素 5）的基因表达水平也显著高于对照组（$P<0.05$），该抗菌肽可通过破坏病原体的细胞膜发挥直接杀菌作用，同时参与肠道菌群稳态调节[71]。以上增强紧密连接和激活抗菌防御的双重作用机制使 CV 成为改善肠道屏障完整性和功能的有效干预手段。

微藻提取物能够通过增强肠道屏障完整性、减轻氧化应激损伤和抑制炎症反应三个途径改善肠道屏障功能[2]。首先，微藻提取物可显著提高 Caco-2 细胞单层中紧密连接蛋白的表达水平，也能够预防结肠炎模

型小鼠中的紧密连接蛋白丢失，从而维持肠道屏障的完整性。同时，氧化应激是肠道炎症的重要诱因之一。微藻提取物通过清除活性氧（如 $H_2O_2$ 诱导的细胞内活性氧水平）和保护细胞膜完整性，减轻氧化应激对肠道上皮细胞的损伤[72]。在抑制炎症方面，微藻提取物能够抑制 TNF-$\alpha$、IL-1$\beta$ 和 IL-6 等促炎细胞因子的产生，并降低炎症介质（如 COX-2 和诱导型一氧化氮合酶）的表达，从而缓解结肠和全身炎症水平[73]。综上，微藻提取物通过多靶点作用保护肠道屏障并抑制炎症，在肠道健康管理中具有潜在应用价值。

### 2.5 调节消化酶活性

微藻（如小球藻和螺旋藻）可通过直接增强消化酶活性，以及调节肠道菌群来间接影响消化酶活性两种机制来改善消化功能。在吉富罗非鱼的实验中，添加小球藻粉和螺旋藻粉的饲料显著提高肠道蛋白酶活性，提高蛋白质消化效率[74]。在断奶猪仔实验中，补充 1 wt.% 螺旋藻或小球藻可显著降低腹泻发生率（尤其是小球藻组），提示肠道环境改善[63]。肠道形态学分析显示，微藻补充组的猪仔空肠绒毛高度显著增加，绒毛高度与隐窝深度的比值也相应提高。绒毛高度的增加通常与消化酶分泌量的增加和肠道吸收表面积的扩大相关，这进一步支持了微藻补充可能通过调节消化酶活性来改善肠道功能的观点。

微藻原料中的单种活性成分表现出良好的肠道功能调节活性，当多种成分相互作用时，可展现出多层次的协同作用。藻蓝蛋白与虾青素可联合清除活性氧，降低肠道炎症因子水平（抗炎与抗氧化协同），并且联合使用显著提升粪便短链脂肪酸（SCFAs，如丁酸）含量，促进阿克曼菌等有益菌增殖（菌群－代谢物调控），同时起到肠道屏障保护作用，即协同降低辐射引起的紧密连接蛋白损伤，从而改善肠道健康[75]。微藻活性物质在肠道中的功能总结如图 2 所示。

## 3 微藻活性成分在功能性食品开发中的应用

功能性食品被定义为不仅提供基本营养，还能额外增强健康或预防疾病的食品。微藻因其独特的生物活性成分（如蛋白质、多糖、维生素、色素等），已成为开发功能性食品的理想原料。微藻被证明对人体健康有促进作用，包括抗高血压、抗肥胖、抗氧化及抗癌等生理活性，对心血管和肠道健康具有显著保护作用[76,77]。同时，微藻中的生物质在不显著改变食品的烹饪或质构的前提下，可提升营养价值，改善产品的感官品质（如色泽和风味）。微藻活性物质及其在食品开发中的应用如图 3 所示，其营养和功能特性汇总如表 2。鉴于其低资源消耗和高生产效率的可持续发展潜力，微藻被公认为最具环保前景的功能性食品原料[78]。

### 3.1 动物肉替代食品的开发

微藻蛋白凭借其高营养价值和可持续生产优势，被视为开发肉类替代品的理想原料。通过创新性的特定加工技术，微藻蛋白可模拟传统肉类的口感和质地，以满足素食者和环保消费者的需求。2021 年推出的全球首款 100% 微藻基汉堡肉饼采用挤压技术制成，每 60 g 产品含有 24 g 优质蛋白质，其蛋白质含量是同质量牛肉或鱼肉的两倍[79]。此外，微藻人造肉中含全部 9 种必需氨基酸，维生素 B12 含量较高且钠含量低，能够满足健康饮食的需求[80]。除了植物基“红肉”，植物基海鲜也是新兴领域。法国初创公司 Algama Foods 开发了纯素海鲜产品（如纯素熏鲑鱼片和金枪鱼片），微藻为这些产品提供了 Omega-3 等关键营养素及天然海鲜风味[81]。同样，瑞典公司 Hooked Foods 也推出了微藻基纯素金枪鱼产品，这些创新食品不仅满足消费者对可持续健康食品的需求，更为缓解全球鱼类资源短缺问题提供了可行方案。

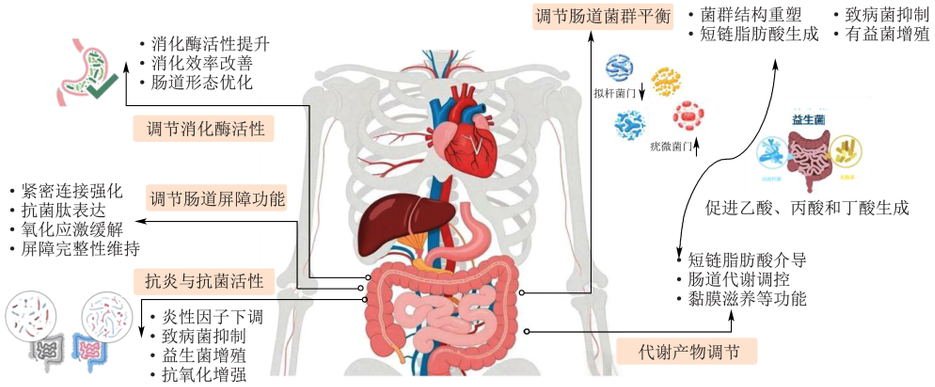



图 2 微藻活性物质在肠道中的功能示意图

**Fig.2 Schematic diagram of the functional mechanism of microalgal bioactive compounds in the gut**




**图 3 微藻活性物质及其在食品开发中的应用**

**Fig.3 Microalgal bioactive compounds and their applications in food development**

**表 2 微藻基配方食品的营养和技术功能特性**

**Table 2 Nutritional and techno-functional properties of microalgae-based formulated food products**

| 食品 | 属 / 种 | 效果 | 参考文献 |
|---|---|---|---|
| 黄油饼干 | 普通小球藻 | 改进了纹理和颜色属性 | [90,91] |
| 饼干 | 螺旋藻 | 可提高蛋白质、铁和多不饱和脂肪酸的浓度 | [92,93] |
| 面条 | 莱茵衣藻和螺旋藻 | 增强蛋白质、膳食纤维，碳水化合物含量降低 | [94-96] |
| 披萨 | 小球藻和大量螺旋藻 | 提高了技术功能和感官品质 | [97] |
| 能量棒 | 小球藻 | 增加蛋白质的含量 | [98,99] |

### 3.2 功能性饮料开发

螺旋藻和小球藻常被添加到果汁和蛋白饮料中制作产品，这些功能性饮料口感清爽，具有抗氧化和免疫增强等保健功能。在发酵乳制品中添加微藻，可显著提升其营养价值，并且微藻中的生物活性物质（胡萝卜素、虾青素和叶黄素）可显著提高抗氧化能力（150%），为消费者提供额外的健康益处[82]。另外，微藻可作为天然色素替代人工着色剂，应用于冰淇淋等乳制品生产，添加 1 wt.% 的微藻即可在提升其优质蛋白和脂肪含量的同时，改善产品的质地、稳定性等物理化学特性[83]。这些应用不仅满足了消费者对天然、健康食品的需求，也为食品工业提供了可持续发展的创新方向。

### 3.3 烘焙食品开发

藻类已被广泛应用于不同的烘焙食品配方中，以丰富其营养和风味。烘焙食品作为营养载体具有独特优势，其加工过程的 pH 值或压力相对稳定，能够较好地保留营养成分和维持生物活性。面包配方中添加 1 wt.% 和 2 wt.% 的螺旋藻粉可显著提升营养价值，蛋白质含量分别增加了 3.17% 和 5.12%，同时抗氧化活性明显增强，必需氨基酸含量显著提高[84,85]。这些改良不仅提升了传统烘焙食品的营养价值，更为开发功能性烘焙食品提供了新思路。

微藻作为功能性食品的理想原料，在可持续性和营养功能上优势显著，但产业化仍面临生物利用率低、感官缺陷等核心瓶颈。生物利用率低本质是细胞壁阻碍营养释放，导致蛋白质、脂质吸收率不足 30%。目前，物理破壁技术和定向酶解是较为有效的解决策略[8]。感官缺陷是因为挥发性硫化物（二甲基硫醚）和醛类（己烯醛）产生腥味，同时叶绿素衍生物导致苦涩感[86]。在食品加工过程中，分子包埋等掩蔽技术和发酵处理可在一定程度上缓解该问题，有待进一步开发[87]。除此之外，其安全性问题仍需重点关注。微藻培养过程中可能受到重金属（如铅、镉）、微生物毒素（如微囊藻毒素）及环境有机污染物（多环芳烃、农药残留）的污染[88]，若原料处理不当，这些污染物可能通过食物对人体肝、肾等器官造成潜在危害。此外，微藻中的某些蛋白质（如藻蓝蛋白）、细胞壁多糖（如几丁质）可能引发过敏反应。因此，在微藻功能性食品开发中，需严格把控微藻原料品质，并通过脱敏处理、污染物检测（如质谱联用技术）及致敏性评估等手段确保产品安全性，同时需在产品标签中明确标注过敏原信息以保障消费者权益[89]。

## 4 结论

尽管微藻源营养成分及健康机制的研究已取得一定进展，但其分子作用机制、协同调控及生物利用度等研究仍有待深入。比如，未来研究可着重于深入解析特定菌属（如双歧杆菌）与不同类型 Omega-3 PUFAs 的分子互作机制，并针对个体化差异开发基于菌群－免疫轴精准调控的干预策略。并且其在食品、健康和制药领域的应用有待继续开发。

微藻 PUFAs 具有较高的氧化稳定性，并且能有效避免鱼类来源常见的异味问题，考虑到 PUFAs 在心血管疾病预防中的明确功效，微藻在该领域的产业化前景值得期待。在维生素供给方面，微藻作为天然维生素库能高效积累维生素 A 前体（如 $\alpha$-和 $\beta$-胡萝卜素）及其生物活性形式（如视黄醇），这些成分具有抗癌潜力，但是关于微藻维生素的生物可及性和生物利用度的系统研究不足，这成为健康监管机构和食品工业将其纳入功能性配方的关键瓶颈。实践层面，微藻生物质已成功应用于面食制品、高蛋白饮料等多种食品强化，临床数据证实其营养价值提升，但微藻特有的风味仍需风味调控技术（如特定香料的配伍）加以解决。

未来，随着健康消费理念的普及和食品科技的进步，微藻有望在全球功能性食品市场实现突破，显著降低工艺创新成本，通过微胶囊或乳液等改善功能性食品的营养及感官特性，最终开发针对特定人群（如

素食者、代谢综合征患者）的定制化产品。这种兼具营养强化和环境友好特性的生物资源，或将重塑现代食品工业的原料体系，为可持续发展目标提供新的解决方案。

## 参考文献


[1] RAMOS-ROMERO S, TORRELLA J R, PAGÈS T, et al. Edible microalgae and their bioactive compounds in the prevention and treatment of metabolic alterations [J]. Nutrients, 2021, 13(2): 563-579.

[2] GUO W, ZHU S, FENG G, et al. Microalgae aqueous extracts exert intestinal protective effects in Caco-2 cells and dextran sodium sulphate-induced mouse colitis [J]. Food & Function, 2019, 11(1): 1098-1109.

[3] 郭瑞雪,杨友,张诗雯,等.小球藻高价值活性物质研究现状及展望[J].河北北方学院学报(自然科学版),2020,36(3):54-60.

[4] EILAM Y, KHATTIB H, PINTEL N, et al. Microalgae-sustainable source for alternative proteins and functional ingredients promoting gut and liver health [J]. Global Challenges, 2023, 7: 1-24.

[5] SUN Z, CHI Q, SUN L, et al. Protein extraction from microalgae residue and nutritional assessment [J]. Bioprocess and Biosystems Engineering, 2022, 45(11): 1879-1888.

[6] XU Y, TONG X, LU Y, et al. Microalgal proteins: Unveiling sustainable alternatives to address the protein challenge [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 276: 133747.

[7] LESTINGI A, ALAGAWANY M, DI CERBO A, et al. Spirulina (*Arthrospira platensis*) used as functional feed supplement or alternative protein source: a review of the effects of different dietary inclusion levels on production performance, health status, and meat quality of broiler chickens [J]. Life, 2024, 14(12): 1537-1618.

[8] 张林彤,杨雅丹,艾依涵,等.微藻蛋白质的提取纯化及其在食品应用中的现状与挑战[J].食品工业科技,2025,46(17):1-10.

[9] 陈峰,杨帅伶,刘宾.微藻蛋白质及其在食品中的应用研究进展[J].中国食品学报,2022,22(6):21-32.

[10] 陈金换,安红周,孙嘉瑜,等.植物蛋白的改性加工及热点应用领域研究进展[J].粮油食品科技,2025,33(2):83-89.

[11] TOUNSI L, HENTATI F, BEN HLIMA H, et al. Microalgae as feedstock for bioactive polysaccharides [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 221: 1238-1250.

[12] CAPORGNO M P, MATHYS A. Trends in microalgae incorporation into innovative food products with potential health benefits [J]. Frontiers in Nutrition, 2018, 5: 58-68.

[13] CAMILA A V-M, MERLANO J A R, ALFREDO O G, et al. Antimicrobial peptides (AMPs) from microalgae as an alternative to conventional antibiotics in aquaculture [J]. Preparative Biochemistry & Biotechnology, 2024, 55(1): 26-35.

[14] XUE H, TANG Y, ZHA M, et al. The structure-function relationships and interaction between polysaccharides and intestinal microbiota: a review [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 291: 139063.

[15] LV K, YUAN Q, LI H, et al. *Chlorella pyrenoidosa* polysaccharides as a prebiotic to modulate gut microbiota: physicochemical properties and fermentation characteristics *in vitro* [J]. Foods, 2022, 11(5): 725-741.

[16] WAN P, LIU H, DING M, et al. Physicochemical characterization, digestion profile and gut microbiota regulation activity of intracellular polysaccharides from *Chlorella zofingiensis* [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 253(Pt 3): 126881.

[17] LIU B, TOMTONG P, CHAROENSIDDHI S, et al. Exploring *Morchella esculenta* polysaccharide extracts: *in vitro* digestion, fermentation characteristics, and prebiotic potential for modulating gut microbiota and function [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 318: 144910.

[18] PAIS R, CONDE T, NEVES B B, et al. Bioactive lipids in *dunaliella salina*: implications for functional foods and health [J]. Foods, 2024, 13(20): 3321-3339.

[19] ANGELO D M, ARIANNA S, ELISABET S, et al. Challenging microalgal vitamins for human health [J]. Microbial Cell Factories, 2020, 19(1): 201-224.

[20] GROSSMAN A. Nutrient acquisition: the generation of bioactive vitamin B12 by microalgae [J]. Current Biology, 2016, 26(8): R319-R321.

[21] LJUBIC A, JACOBSEN C, HOLDT S L, et al. Microalgae *Nannochloropsis oceanica* as a future new natural source of vitamin D3 [J]. Food Chemistry, 2020, 320: 126627.

[22] PEREIRA J, SIMÕES M, SILVA J L. Microalgal assimilation of vitamin B12 toward the production of a superfood [J]. Journal of Food Biochemistry, 2019, 43(8): e12911.

[23] ANANTHARAJAPPA K, DHARMESH S M, RAVI S. Gastro-protective potentials of *Spirulina*: role of vitamin B(12) [J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 57(2): 745-753.

[24] MARZORATI S, SCHIEVANO A, IDÀ A, et al. Carotenoids, chlorophylls and phycocyanin from Spirulina: supercritical $CO_2$ and water extraction methods for added value products cascade [J]. Green Chemistry, 2022, 22: 1-21

[25] PHAM V T, DOLD S, REHMAN A, et al. Vitamins, the gut microbiome and gastrointestinal health in humans [J]. Nutrition Research, 2021, 95: 35-53.

[26] ZHANG Y, LIU L, WEI C, et al. Vitamin K2 supplementation improves impaired glycemic homeostasis and insulin sensitivity for type 2 diabetes through gut microbiome and fecal metabolites [J]. BMC Medicine, 2023, 21(1): 174.

[27] TARENTO T D C, MCCLURE D D, VASILJEVSKI E, et al. Microalgae as a source of vitamin K1 [J]. Algal Research, 2018, 36: 77-87.

[28] SUN J, ZHANG Y-G. Vitamin D receptor influences intestinal barriers in health and disease [J]. Cells, 2022, 11(7): 1129-1152.

[29] VISCONTI B, PAOLINO G, CAROTTI S, et al. Immunohistochemical expression of VDR is associated with reduced integrity of tight junction complex in psoriatic skin [J]. Journal of the European Academy of Dermatology and Venereology, 2015, 29(10): 2038-2042.

[30] PAGNINI C, DI PAOLO M C, GRAZIANI M G, et al. Probiotics and vitamin D/vitamin D receptor pathway interaction: potential therapeutic implications in inflammatory bowel disease [J]. Frontiers in Pharmacology, 2021, 12: 747856.

[31] SHI Y, LIU Z, CUI X, et al. Intestinal vitamin D receptor knockout protects from oxazolone-induced colitis [J]. Cell Death & Disease, 2020, 11(6): 461-472.

[32] MA Y, LI C, SU W, et al. Carotenoids in skin photoaging: unveiling protective effects, molecular insights, and safety and bioavailability frontiers [J]. Antioxidants (Basel), 2025, 14(5): 577-603.

[33] 杨桂强,吴玉钧.钝顶螺旋藻*β*-类胡萝卜素的优化提取工艺研究

[J].中国食品工业,2024,22:143-146.
[34] WLAŹLAK S, BIESEK J. *Spirulina platensis* and *Chlorella vulgaris* in poultry nutrition-a review of current research and potential opportunities [J]. Poultry Science, 2025, 104(9): 105456.
[35] XIE Y Y, LI W J, ZHU L M, et al. Effects of phycocyanin in modulating the intestinal microbiota of mice [J]. Microbiologyopen, 2019, 8(9): e00825.
[36] GRÁCIO M, FERREIRA J, STEINRÜCKEN P, et al. The Volatile composition and the potential health benefits of different microalgae strains [J]. Foods, 2024, 13(14): 2174-2189.
[37] ROCHA H R, PINTADO M E, GOMES A M, et al. Carotenoids and intestinal harmony: exploring the link for health [J]. Foods, 2024, 13(11): 1599-1624.
[38] KHAN I, HUSSAIN M, JIANG B, et al. Omega-3 long-chain polyunsaturated fatty acids: metabolism and health implications [J]. Progress in Lipid Research, 2023, 92: 101255.
[39] BARATA D G, VASILE C, DAN CRISTIAN V. Microalgae as sources of omega-3 polyunsaturated fatty acids: biotechnological aspects [J]. Algal Research, 2021, 58: 102410.
[40] STIEFVATTER L, NEUMANN U, RINGS A, et al. The microalgae *phaeodactylum tricornutum* is well suited as a food with positive effects on the intestinal microbiota and the generation of SCFA: results from a pre-clinical study [J]. Nutrients, 2022, 14(12): 2504-2520.
[41] NAYAK S, AL ASHHAB A, ZILBERG D, et al. Dietary supplementation with omega-6 LC-PUFA-Rich microalgae regulates mucosal immune response and promotes microbial diversity in the zebrafish gut [J]. Biology (Basel), 2020, 9(6): 119-140.
[42] SEARS C, GHOSH S. Excess Omega-6 polyunsaturated fatty acid intake is associated with negative cardiovascular, intestinal and metabolic outcomes in mice [J]. Canadian Journal of Diabetes, 2016, 40(4): 278-279.
[43] SANTAMARINA A B, MOREIRA R G, MENNITTI L V, et al. Low-carbohydrate diet enriched with omega-3 and omega-9 fatty acids modulates inflammation and lipid metabolism in the liver and white adipose tissue of a mouse model of obesity [J]. Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases, 2025,35(8):103932.
[44] FARAG M A, GAD M Z. Omega-9 fatty acids: potential roles in inflammation and cancer management [J]. Journal of Genetic Engineering and Biotechnology, 2022, 20(1): 48-59.
[45] SANTURINO C, LÓPEZ-PLAZA B, FONTECHA J, et al. Consumption of goat cheese naturally rich in omega-3 and conjugated linoleic acid improves the cardiovascular and inflammatory biomarkers of overweight and obese subjects: a randomized controlled trial [J]. Nutrients, 2020, 12(5): 1315-1329.
[46] KUMAR S, KUMAR R, KUMARI A, et al. Astaxanthin: a super antioxidant from microalgae and its therapeutic potential [J]. Journal of Basic Microbiology, 2022, 62(9): 1064-1082.
[47] DELSANTE C, PINNA C, SPORTELLI F, et al. Assessment of the effects of edible microalgae in a canine gut model [J]. Animals, 2022, 12(16): 2100-2115.
[48] WAN Z J, ZHENG J H, ZHU Z G, et al. Intermediate role of gut microbiota in vitamin B nutrition and its influences on human health [J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 13(9): 1031502.
[49] MATOS J,CARDOSO C, BANDARRA N M, et al. Microalgae as healthy ingredients for functional food: a review [J]. Food & Function, 2017, 8(8):2672-2685.
[50] DU L, CHEN C, YANG Y H, et al. Fucoxanthin alleviates lipopolysaccharide-induced intestinal barrier injury in mice [J]. Food Function, 2024, 15(12): 6359-6373.
[51] 张爱娣,崔金玉,张亚宁,等.蓝细菌次级代谢产物伪枝藻素研究进展与展望[J].中国生物工程杂志,2023,43(10):85-95.
[52] SHANNON E, CONLON M, HAYES M. Seaweed components as potential modulators of the gut microbiota [J]. Marine Drugs, 2021, 19(7): 358-408.
[53] PENG M F, BISWAS D. Short chain and polyunsaturated fatty acids in host gut health and foodborne bacterial pathogen inhibition [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2017, 57(18): 3987-4002.
[54] ANGÉLICA V-L, ASCENCIO F, NUÑO K. Microalgae, a potential natural functional food source-a review [J]. Polish Journal of Food and Nutrition Sciences, 2017, 67(4): 251-263.
[55] HO DO M, SEO Y S, PARK H Y. Polysaccharides: bowel health and gut microbiota [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2021, 61(7): 1212-1224.
[56] NAKASHIMA A, SASAKI K, SASAKI D, et al. The alga *Euglena gracilis* stimulates *Faecalibacterium* in the gut and contributes to increased defecation [J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 1074-1082.
[57] TAYLOR H B, GUDI R, BROWN R, et al. Dynamics of structural and functional changes in gut microbiota during treatment with a microalgal *β*-glucan, paramylon and the impact on gut inflammation [J]. Nutrients, 2020, 12(8): 2193-2210.
[58] WANG J G, ZHENG Z B, YANG H, et al. Effect of *β*-1,3/1,6-glucan on gut microbiota of yellow-feathered broilers [J]. AMB Express, 2022, 12(1): 1-13
[59] 王国艳,李燕平,任克良,等.裸藻*β*-葡聚糖对伊拉肉兔生长性能和肠道菌群及组织蛋白表达的影响[J].动物营养学报,2025,37(1):560-570.
[60] 周成旭,田甜,陈海敏,等.海洋微藻*β*-葡聚糖的生物活性分析[J].海洋与湖沼,2014,45(1):66-72.
[61] MA M Y, LI Y H, CHEN J P, et al. High-cell-density cultivation of the flagellate alga *Poterioochromonas malhamensis* for biomanufacturing the water-soluble *β*-1,3-glucan with multiple biological activities [J]. Bioresource Technology, 2021, 337: 125447.
[62] 田甜.海洋微藻*β*-葡聚糖的研究[D].宁波:宁波大学,2012.
[63] FURBEYRE H, VAN MILGEN J, MENER T, et al. Effects of dietary supplementation with freshwater microalgae on growth performance, nutrient digestibility and gut health in weaned piglets [J]. Animal, 2016, 11(2): 183-192.
[64] MARTINS C F, TREVISI P, COELHO D F, et al. Influence of *Chlorella vulgaris* on growth, digestibility and gut morphology and microbiota of weaned piglet [J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 6012-6024.
[65] LI N K, DUAN X Y, ZHOU L H, et al. Bioaccessibility and bioactivities of phenolic compounds from microalgae during *in vitro* digestion and colonic fermentation [J]. Food & Function, 2022, 14(2): 899-910.
[66] LIAO T S, CHEN C Y, LIN C S, et al. Mesobiliverdin IX *α*-enriched microalgae feed additive eliminates reliance on antibiotic tylosin to promote intestinal health of weaning piglets [J]. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition, 2023, 107(6): 1368-1375.
[67] NOVICHKOVA E, NAYAK S, BOUSSIBA S, et al. Dietary application of the microalga *lobosphaera incisa* P127 reduces severity of intestinal inflammation, modulates gut-associated gene expression, and microbiome in the zebrafish model of IBD [J]. Molecular Nutrition & Food Research, 2023, 67(6): e2200253.

[68] ZHOU J J, WANG M, BÄUERL C, et al. The impact of liquid-pressurized extracts of *Spirulina, Chlorella* and *Phaedactylum tricornutum* on *in vitro* antioxidant, antiinflammatory and bacterial growth effects and gut microbiota modulation [J]. Food Chemistry, 2022, 401(7): 134083.

[69] LEE J Y, YOON J H, AN S H, et al. Intestinal immune cell populations, barrier function, and microbiomes in broilers fed a diet supplemented with *chlorella vulgaris* [J]. Animals, 2023, 13(14): 2380-2396.

[70] VAN NEROM S, DE GRANDE A, VAN IMMERSEEL F, et al. *Chlorella vulgaris* supplementation in broiler feed: effect on performance, intestinal health, meat quality and animal welfare under an *Eimeria vaccine* challenge [J]. British Poultry Science, 2025, 20: 1-11.

[71] VAN DER LINDE C, BARONE M, TURRONI S, et al. An *in vitro* pilot fermentation study on the impact of *chlorella pyrenoidosa* on gut microbiome composition and metabolites in healthy and coeliac subjects [J]. Molecules, 2021, 26(8): 2330-2345.

[72] LI S, GUO W, ZHANG M, et al. Microalgae polysaccharides exert antioxidant and anti-inflammatory protective effects on human intestinal epithelial cells *in vitro* and dextran sodium sulfate-induced mouse colitis *in vivo* [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 254(Pt 1): 127811.

[73] LEE A H, SHIN H Y, PARK J H, et al. Fucoxanthin from microalgae *Phaeodactylum tricornutum* inhibits pro-inflammatory cytokines by regulating both NF-*κ*B and NLRP3 inflammasome activation [J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 543-555.

[74] 王岩.不同微藻对吉富罗非鱼生长性能、消化酶活性及免疫力的影响[J].饲料研究,2025,48(3):69-73.

[75] ZHANG D X, HE J, CUI J R, et al. Oral Microalgae-nano integrated system against radiation-induced injury [J]. ACS Nano, 2023, 17(11): 10560-10576.

[76] KOYANDE A K, CHEW K W, RAMBABU K, et al. Microalgae: a potential alternative to health supplementation for humans [J]. Food Science and Human Wellness, 2019, 8(1): 16-24.

[77] AMPOFO J, ABBEY L. Microalgae: bioactive composition, health benefits, safety and prospects as potential high-value ingredients for the functional food industry [J]. Foods, 2022, 11(12): 1744-1764.

[78] 彭文岚,王广建,孙宗彬.微藻在能源、环保及食品保健中的应用[J].化工科技市场,2010,33(2):18-21.

[79] ŽUGČIĆ T, ABDELKEBIR R, BARBA F J, et al. Effects of pulses and *microalgal* proteins on quality traits of beef patties [J]. Journal of Food Science and Technology, 2018, 55(11): 4544-4553.

[80] ZHU J Y, XIAO X, DU W H, et al. Leveraging microalgae as a sustainable ingredient for meat analogues [J]. Food Chemistry, 2024, 450: 139360.

[81] SIDDIQUI S A, UCAK İ, AFREEN M, et al. Microalgae as a potential raw material for plant-based seafood alternatives: a comprehensive review [J]. Food Science & Nutrition, 2024, 12(11): 8559-8593.

[82] DA SILVA S C, FERNANDES I P, BARROS L, et al. Spray-dried Spirulina platensis as an effective ingredient to improve yogurt formulations: testing different encapsulating solutions [J]. Journal of Functional Foods, 2019, 60: 103427.

[83] TIEPO C B V, GOTTARDO F M, MORTARI L M, et al. Addition of Spirulina platensis in handmade ice cream: phisicochemical and sensory effects/Adição de Spirulina platensis em sorvete caseiro: efeitos físico-químicos e sensoriais [J]. Brazilian Journal of Development, 2021, 7(9): 88106- 88123.

[84] 席慧敏,颜睿萱,石秋语,等.小球藻风味面包的配方工艺及性质研究[J].食品安全质量检测学报,2024,15(15):136-146.

[85] MONTEVECCHI G, SANTUNIONE G, LICCIARDELLO F, et al. Enrichment of wheat flour with Spirulina. Evaluation of thermal damage to essential amino acids during bread preparation [J]. Food Research International, 2022, 157: 111357.

[86] FU Y L, CHEN T P, CHEN S H Y, et al. The potentials and challenges of using microalgae as an ingredient to produce meat analogues [J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 112: 188-200.

[87] CHAN A M Z, HAU V J H, HABERKORN I, et al. Strategies to overcome challenges in upcycling industrial side-streams into microalgae-based foods: *auxenochlorella protothecoides* as a case study [J]. Current Opinion in Food Science, 2025, 63: 101310.

[88] WITHANA W A T N, GUNARATHNA D M D I, DISSANAYAKE D M G I, et al. Microalgae toxins in food products and impact on human health: a review [J]. Frontiers in Nutrition, 2025, 12: 1603843.

[89] SALEHIPOUR-BAVARSAD F, NEMATOLLAHI M A, PISTOCCHI R, et al. Algal food safety:possible contaminations, challenges of harmonized quality assessments, and suggested recommendations for the nascent industry of microalgae-based products [J]. Algal Research, 2024, 81: 103579.

[90] GOUVEIA L, BATISTA A P, MIRANDA A, et al. *Chlorella vulgaris* biomass used as colouring source in traditional butter cookies [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2007, 8(3): 433-436.

[91] FADILA A N, WIDYANINGRUM D. Developing cookies containing *Chlorella*: Proximate composition, carotenoid content, and sensory acceptance [J]. E3S Web of Conferences, 2023, 426: 5

[92] PAULA DA SILVA S, FERREIRA DO VALLE A, PERRONE D. Microencapsulated *Spirulina maxima* biomass as an ingredient for the production of nutritionally enriched and sensorially well-accepted vegan biscuits [J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 142(1): 110997.

[93] SAHIN O I. Functional and sensorial properties of cookies enriched with SPIRULINA and DUNALIELLA biomass [J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 57(5): 3639-3646.

[94] 寇锟,陈复生,杜艳,等.莱茵衣藻蛋白对小麦粉面条品质的影响[J].粮食与油脂,2025,38(1):38-42,66.

[95] 张晴晴,吕莹果,李平,等.螺旋藻粉对面团性质及面条品质的影响[J].河南工业大学学报(自然科学版),2024,45(4):46-54,63.

[96] SU K, FAN Z H, USMAN M, et al. Effect of *Spirulina platensis* on the structure and aggregation of gluten proteins to improve texture and physiochemical properties of wheat noodles [J]. Food Hydrocolloids, 2025, 162: 110959.

[97] FRADIQUE M, BATISTA A P, NUNES M C, et al. Incorporation of *Chlorella vulgaris* and *Spirulina maxima* biomass in pasta products. Part 1: Preparation and evaluation [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2010, 90(10): 1656-1664.

[98] RAJA R, COELHO A, HEMAISWARYA S, et al. Applications of microalgal paste and powder as food and feed: an update using text mining tool [J]. Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences, 2018, 7(4): 740-747.

[99] FANARI F, COMAPOSADA J, BOUKID F, et al. Enhancing energy bars with microalgae: a study on nutritional, physicochemical and sensory properties [J]. Journal of Functional Foods, 2023, 109: 105768.