

小球藻的营养成分、生物活性及其在食品加工中的应用研究进展

徐炳政¹ 徐宗喜¹ 张 健¹ 梁荣荣¹ 梁玉思²

(1. 青岛琅琊台集团股份有限公司, 山东 青岛 266400; 2. 青岛滨海学院酒店管理学院, 山东 青岛 266555)

摘要: 小球藻(*Chlorella vulgaris*)作为一种绿色微藻,因其卓越的营养价值被食品行业广泛认可。文章系统综述了该藻类所富含的多种营养成分,包括蛋白质、脂质、碳水化合物、维生素、色素及矿物质等,以及由其赋予的多种生物活性,如抗氧化、抗炎、免疫调节、抑菌与抗病毒、抗癌、解毒、辅助抗糖尿病、抗高血压与高血脂、神经保护、抗抑郁及益生元活性等。此外,还阐述了小球藻在食品应用中的研究进展,并探讨了当前面临的基于营养成分与低成本协同的规模化生产技术差距、营养活性机制不明确以及合成生物学应用中的安全性与政策限制等商业化应用挑战。基于此,提出了高效多样化营养成分生产,生物利用度的提升以及营养活性机制的深入解析等未来应聚焦的研究方向。

关键词: 小球藻;营养成分;生物活性;食品;应用

Research progress on nutritional components, bioactive properties, and application of *Chlorella vulgaris* in food

XU Bingzheng¹ XU Zongxi¹ ZHANG Jian¹ LIANG Rongrong¹ LIANG Yusi²

(1. Qingdao Langyatai Group Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266400, China; 2. Hotel Management Institute, Qingdao Binhai University, Qingdao, Shandong 266555, China)

Abstract: *Chlorella vulgaris*, a green microalga, is widely recognized in the food industry for its outstanding nutritional value. This review systematically summarizes the diverse nutritional components enriched in this microalga, including proteins, lipids, carbohydrates, vitamins, pigments, and minerals, as well as the various bioactivities conferred by these components, such as antioxidant, anti-inflammatory, immunomodulatory, antibacterial and antiviral, anticancer, detoxifying, adjuvant antidiabetic, antihypertensive and antihyperlipidemic, neuroprotective, antidepressant, and prebiotic activities. Additionally, the research progress of *C. vulgaris* in food applications is elaborated, and the current challenges in its commercialization are discussed, including the technological gap in large-scale production that coordinates nutritional composition and low-cost requirements, the unclear mechanisms underlying its nutritional and bioactive effects, as well as safety concerns and policy restrictions associated with synthetic biology applications. Based on these considerations, future research directions are proposed, focusing on the efficient production of diverse nutritional components, the improvement of bioavailability, and the in-depth elucidation of the mechanisms underlying nutritional and bioactive functions.

Keywords: *Chlorella vulgaris*; nutritional components; bioactive properties; food; application

小球藻(*Chlorella vulgaris*)是一种属于绿藻门绿藻纲绿球藻目卵囊藻科小球藻属的绿色微藻。这种单细胞藻类最早于1890年由 Beijerinck^[1]发现,是一种具有明确细胞核的微藻。小球藻富含蛋白质、多糖和脂质,还含有重要的生物活性物质,如叶绿素、维生素和矿物质等^[2]。近年来,国内外研究证明这些成分具有广泛的生物活性,包

基金项目: 青岛市产业培育引领专项(编号:25-1-1-gigg-53-hy);山东省重点研发计划(编号:2022CXGC020414)

通信作者: 徐炳政(1990—),男,青岛琅琊台集团股份有限公司高级工程师,硕士。E-mail: xubzlyt@163.com

收稿日期: 2025-09-25 **改回日期:** 2026-03-11

引用格式: 徐炳政,徐宗喜,张健,等. 小球藻的营养成分、生物活性及其在食品加工中的应用研究进展[J]. 食品与机械, 2026, 42(4): 220-228.

Citation: XU Bingzheng, XU Zongxi, ZHANG Jian, et al. Research progress on nutritional components, bioactive properties, and application of *Chlorella vulgaris* in food[J]. Food & Machinery, 2026, 42(4): 220-228.

括强效抗氧化、抗炎、免疫调节、抗病毒、抗癌、抗糖尿病、降脂和解毒等,但这些研究较为分散,相互关联度不强,综合借鉴性较差。因此,文章拟重点阐述小球藻的营养成分与生物活性的最新研究以及其在食品中的应用进展,同时探讨当前生产技术和产业化发展面临的主要挑战,并对其未来的研究和发展方向进行展望,旨在为小球藻的深入研究和行业的进步提供依据。

1 小球藻的营养成分

小球藻是一种单细胞绿色微藻,具有丰富且复杂的营养成分,涵盖了蛋白质、脂质、碳水化合物、维生素、色素和矿物质等(表1),使其具有广泛的生物活性,在食品、药品、营养保健品和动物饲料等多个行业具有极高的应

用价值。

1.1 蛋白质

蛋白质是小球藻内含量最丰富的营养物质之一,这使得小球藻作为可持续性蛋白质来源具有极大的应用价值与前景。小球藻蛋白质含量通常为45%~67%,其因生长条件不同而不同。这些蛋白质中约有20%与细胞壁相关,而约50%位于细胞内,其余30%的蛋白质为游离状态,可能通过进出细胞参与细胞信号传导或运输等过程,促进各种细胞功能^[22]。小球藻蛋白含有所有人体必需氨基酸,根据基于人体的氨基酸需求和消化蛋白质的能力而普遍选定的蛋白质消化率校正氨基酸评分范围为0.29~0.81^[23-24],相比之下,虽然低于鸡蛋(1.0)、大豆(0.91)和牛肉(0.92)^[25],但普遍高于大米、鹰嘴豆、黑豆、

表1 小球藻中的主要营养成分
Table 1 Main nutritional components in *Chlorella vulgaris*

营养类别	营养成分	一般含量	功能
蛋白质 ^[3-5]	总蛋白	45%~67%	细胞的生长、修复和维护
脂质 ^[6-7]	总脂质	30%~40%	能量和碳储量
	中性脂质(单酰甘油、双酰甘油和三酰甘油)	各不相同	贮藏在细胞器中
	极性脂质(磷脂和糖脂)	各不相同	主要存在于细胞壁和细胞器膜中
碳水化合物 ^[8-12]	总碳水化合物	12%~50%	能量和碳储量
	淀粉	30%~50%	主要成分,能量储备
	纤维素	10.0%~47.5%	细胞壁组成成分
	单糖、多糖	各不相同	细胞壁组成成分
维生素 ^[14-15]	维生素B ₁	10~65 mg/kg	作为辅酶参与糖代谢
	维生素B ₂	20~90 mg/kg	黄素辅酶的必需前体,参与氧化还原反应
	维生素B ₆	9~30 mg/kg	代谢酶的辅助因子,强抗氧化
	维生素B ₁₂	600~5 000 mg/kg	参与核酸合成及蛋白质代谢
	维生素B ₃ (烟酸)	200~800 mg/kg	参与细胞抗氧化机制
	维生素B ₉ (叶酸)	3~36 mg/kg	碳代谢的必需辅助因子,参与嘌呤环的合成
	维生素C	70~2 000 mg/kg	多种酶的辅助因子,参与光合作用、激素生物合成,抗氧化
	维生素E	30~450 mg/kg	细胞膜组成成分,抗光氧化应激
	维生素K	3~35 mg/kg	氧化还原辅因子
	维生素A	10~650 mg/kg	由β-胡萝卜素转化,抗氧化
色素 ^[16-18]	β-胡萝卜素	7~12 000 mg/kg	抗光氧化应激
	叶黄素	1 180~7 500 mg/kg	参与叶绿体的抗氧化
	叶绿素a	250~9 630 mg/kg	参与叶绿体的抗氧化
	叶绿素b	72~5 770 mg/kg	参与叶绿体的抗氧化
矿物质元素 ^[19-21]	钠	3 820~16 450 mg/kg	维持细胞渗透压平衡
	磷	6 500~27 080 mg/kg	参与细胞的能量代谢、脂类合成以及核酸的合成
	钙	940~7 030 mg/kg	细胞壁主要成分
	钾	499.2~132 950 mg/kg	维持细胞渗透压平衡
	铁	1 289~2 991 mg/kg	参与细胞的能量代谢
	其他(镁、铬、铜、锌、锰、硒等)	各不相同	酶、蛋白质组成部分,促进细胞增长和光合作用等

扁豆、芸豆等产品^[26]。

1.2 脂质

小球藻中的脂质一般占 30%~40%，主要由多不饱和脂肪酸组成，最主要的脂肪酸包括亚油酸、油酸、棕榈酸和 α -亚麻酸，其中亚油酸和 α -亚麻酸分别是主要的 Omega-6 和 Omega-3 脂肪酸^[27]。脂肪酸谱取决于微藻的脂质代谢，与藻种的多样性以及生长条件有关，采用不同的菌株和不同的培养条件调控微藻脂质代谢可根据不同应用决定。例如，Moradi-Kheibari 等^[28]优化了不同的外源氮源添加，在混合营养生长条件下生长的小球藻脂质总量可达 51.63%，这些脂质含有棕榈酸、油酸，符合生物柴油标准中的脂肪酸组成，这种模式更适用于生物柴油的生产。相反，如果在刺激性诱变和适应性进化生长条件下生长，其脂肪酸谱不适合生物柴油，反而更适合用于营养和医药用途，因为其更多集中于单不饱和脂肪酸和多不饱和脂肪酸，如 EPA 和 DHA 等^[29]。而 Hasan 等^[30]在培养小球藻过程中采用外源钙强化处理，不仅提高了小球藻中的总脂质和脂肪酸含量（约 2 倍），同时显著增加了 1.7 倍的生物量，这对改变小球藻脂质代谢途径和商业化生产具有指导意义。

1.3 碳水化合物

小球藻中碳水化合物一般为 12%~50%。小球藻中碳水化合物主要由多糖构成，该类多糖主要由葡萄糖、鼠李糖、甘露糖和半乳糖组成，其中包括 β -葡聚糖等复杂结构，具有免疫刺激、益生元和抗氧化等特性^[31]。此外，还含有少量单糖，例如葡萄糖和糖原（1 种作为能量储备的多糖）。小球藻多糖在食品、化妆品、动物饲料和农业领域具有显著的应用潜力^[32]。小球藻淀粉的直链淀粉一支链淀粉比例为 30%~40%，与商业土豆淀粉相比，小球藻淀粉具有较好的消化率，提取的淀粉也可根据需要糊化或发酵步骤进一步生产功能性食品^[10]。纤维素是小球藻细胞壁的重要组成部分之一，具有良好的机械性能、阻隔性能、生物相容性以及可生物降解性，未来可应用于食品、可降解材料等传统领域以及纤维素纳米纤维、纳米晶体等纳米级新材料中^[33]。微藻被称为第三代生物原料，小球藻碳水化合物中木质素含量低（可发酵糖含量高），糖化更容易，因此是一种更有前景且可持续的生物乙醇生产物质来源^[34]。

1.4 维生素和矿物质

在微藻中，维生素参与多种过程和功能，例如作为关键代谢途径的前体或辅酶，控制和调节组织生长和细胞功能，或作为抗氧化剂。小球藻能够生产和或积累多种维生素，含有高等植物所不具备的维生素 B₁₂、维生素 K 或维生素 D 等。小球藻产品的叶酸含量高于菠菜，富含维生素 B₁₂ 且不含非活性类咕啉化合物，是这两种维生素的人类极佳来源^[15]。小球藻不仅能够提供这些必需维生

素，也是必需矿物质的重要来源，包括铁、钙、钾和磷等，这些矿物质对骨骼发育、新陈代谢、酶活性、抗氧化防御和免疫反应等都有直接促进作用^[35]。由于含有这些维生素和矿物质，小球藻可为人体和动物提供微量营养素。

1.5 色素

小球藻中最丰富的色素为叶绿素，其干重可达 1%~2%，存在于类囊体中，是具有生物色素潜力的微藻之一。同时还含有大量的类胡萝卜素，它们通过捕获光线作为辅助色素^[36]。叶绿素不仅是光合作用的关键成分，还具有抗氧化和解毒作用，在营养保健和医疗应用领域具有极大的应用价值^[37-38]。此外，将小球藻或小球藻叶绿素作为抗氧化剂并将其应用于化妆品中具有广阔的前景^[39-40]。除了叶绿素外，小球藻中的 β -胡萝卜素、叶黄素和玉米黄质等类胡萝卜素则在人类健康中发挥着至关重要的作用，包括改善视力、减少炎症和预防氧化应激相关疾病^[41]。近年来，类胡萝卜素市场正在快速增长，小球藻等微藻越来越多地被视为可持续、高效的类胡萝卜素生产来源^[42]。

2 小球藻的生物活性

2.1 抗氧化活性

小球藻的抗氧化活性主要源于其丰富的生物活性物质，例如多糖、脂质、维生素、色素等成分^[43]。这些成分能够单独或者协同作用，参与阻断部分活性氧代谢生成过程，并清除脂质过氧化物、过氧化氢、羟自由基和超氧化物离子^[44]，从而改善神经系统疾病^[45]、心血管疾病、糖尿病^[46]以及癌症^[47]。

小球藻的抗氧化活性机制一方面是其抗氧化成分具有羟自由基等清除特性，同时具有低氧化还原电位，从而降低脂质过氧化过程。此外，小球藻是必需和非必需氨基酸的植物来源，例如支链氨基酸，其抗氧化作用包括抗氧化防御蛋白的表达和刺激抗氧化 DNA 修复^[48]。另一方面，氧化应激状态的改善和自由基的减少可通过抑制 Tgfb1 和 Tgfb2 直接或间接抑制 TGF- β 信号通路，从而防止氧化性 DNA 损伤^[49]。此外，补充小球藻可改善红细胞抗氧化状态，减少膜中磷脂氢过氧化物的积累，预防与红细胞老化相关的疾病^[50]。

2.2 抗炎活性

炎症性疾病源于免疫系统失调。环氧合酶和核转录因子(NF- κ B)等在炎症过程中发挥着至关重要的作用，通过激活前列腺素产生和诱导炎症细胞因子表达，启动和维持炎症反应。这是机体抵御感染的重要机制，但过度激活则可能导致炎症以及炎症性疾病产生^[51]。小球藻能够通过限制促炎因子的表达发挥抗炎作用，并通过调节脂质代谢影响生物膜的流动性主要是其中两种化合物能够与环氧合酶和 NF- κ B 诱导激酶两种物质具有强亲和

力,能够与其活性位点中的关键残基(氢键和疏水键)形成稳定的相互作用,从而抑制其活性^[52]。

2.3 免疫调节活性

免疫系统由一组复杂的过程组成,能够抵御各种病原体,这些防御机制可分为先天免疫和适应性免疫,其中特定的免疫成分会聚集在一起以限制感染。Wu等^[53]研究发现,小球藻多糖能够刺激巨噬细胞分泌促炎细胞因子TNF- α 和IL-6,也能显著诱导巨噬细胞产生一氧化氮,激活巨噬细胞的免疫活性。人体试验^[54]也证明,补充8周的小球藻片可通过增强自然杀伤NK细胞活性和分泌血清干扰素- γ 、白细胞介素-1 β 、白细胞介素-12以及IL-1 β (Th-1细胞诱导的细胞因子),为正常人增强免疫能力。

2.4 抑菌和抗病毒活性

小球藻是发现较早的具有抗生素活性的单细胞藻类^[55]。Shaima等^[56]研究发现,小球藻提取物对枯草芽孢杆菌、铜绿假单胞菌、克雷伯氏菌、葡萄球菌、肠球菌和大肠杆菌具有抑菌活性,对枯草芽孢杆菌、金黄色葡萄球菌和粪肠球菌的抑菌圈相当于广谱抗生素氧氟沙星。小球藻的抑菌活性主要源于其所含的环肽、萜类化合物、脂质、多糖、多酚等。其抑菌机制可能源于其中某些氧化化合物能够与巯基发生反应或通过与蛋白质的其他非特异性相互作用;某些萜类化合物能够通过亲脂性化合物破坏细胞膜;某些脂肪酸可能与破坏电子传递链和氧化磷酸化、破坏营养吸收、自氧化降解产物和过氧化物的产生、细菌细胞的直接裂解或酶活性的抑制有关^[57-58]。

除了光谱抑菌活性外,小球藻也显示出了显著的抗病毒活性。小球藻中酸性多糖对包膜病毒具有很强的抗病毒活性,它们与病毒糖蛋白包膜的带正电荷区域相互作用,形成不可逆复合物,从而占据病毒附着的位置^[59]。

2.5 抗癌活性

小球藻中叶黄素、多糖、小球藻生长因子和其他肽、脂肪酸以及多酚等活性成分可以通过DNA损伤、超氧化物和细胞质Ca²⁺离子增加以及线粒体膜电位降低诱导处理后的癌细胞凋亡^[60]。此外,还可以通过细胞应激激活p53,细胞色素c从线粒体释放并与APAF-1偶联并激活胱天蛋白酶9,随后激活胱天蛋白酶3和7,最终导致细胞凋亡^[61]。Hamouda等^[47,62]研究表明,小球藻提取物对人类前列腺癌、肝细胞癌、结直肠癌、乳腺癌及上皮样癌等均具有抗肿瘤作用。

2.6 解毒活性

重金属对生物体具有毒性作用,可通过代谢干扰或诱变引起,因此其对健康的多种影响已成为全球性问题。小球藻对铬、铅和汞引起的机体毒性具有解毒活性,主要是通过诱导细胞中参与重金属解毒的金属硫蛋白MT样蛋白来实现,维持细胞氧化还原稳态和防止氧化损伤,此外也作为重金属整合剂,将重金属通过粪便排出

体外^[63-64]。

小球藻对某些常见有毒化合物也具有类似解毒活性。Li等^[65]研究发现,小球藻提取物对四氯化碳具有解毒作用,其机制可能在于阻断细胞色素同工酶介导的四氯化碳生物活性,从而提高谷胱甘肽水平、抗氧化酶活性和清除自由基。Vijayavel等^[66]证实小球藻能够通过调节苯中毒过程中的抗氧化状态和脂质过氧化来发挥其解毒活性。Lee等^[67]发现,小球藻作为膳食补充剂对致癌杂环胺具有一定的预防作用。这些研究表明,小球藻作为膳食补充剂,在重金属、有毒化合物解毒方面具有极大的应用前景。

2.7 辅助抗糖尿病活性

Priambodo^[68]在研究小球藻时发现了其中含有玉米赤霉烯酮,具有抑制 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶活性的能力效果与标准的商业抑制剂阿卡波糖类似。Kaoboon等^[69]发现,小球藻脂质提取物中的棕榈酸和硬脂酸可以通过与 α -葡萄糖苷酶和 α -淀粉酶的活性位点结合来抑制,从而减少碳水化合物的消化和餐后血糖峰值。然而,目前对于小球藻的辅助抗糖尿病活性人体试验研究较少,且机制尚不明确。因此,需要进一步评估小球藻降血糖作用,并发现有效剂量的小球藻对胰岛素敏感性产生积极影响的原因。

2.8 抗高血压和高血脂活性

Murakami等^[70]报道,小球藻可通过调节肾素-血管紧张素-醛固酮系统来降低血压。Suetsuna等^[71]则发现小球藻中的生物肽对自发性高血压大鼠表现出显著的抗高血压作用。小球藻脂质组分中含有大量的抗氧化剂,包括类胡萝卜素(尤其是叶黄素)等,以及参与主动脉胶原蛋白和弹性蛋白代谢的磷脂,其对高血压的改善作用是由这些成分的协同作用引起的。

小球藻不饱和脂肪酸可以通过激活脂肪组织和肝脏中的AMPK信号通路来减少高脂饮食诱导的脂肪细胞肥大。Ryu等^[72]证明,膳食补充小球藻能够降低极低密度脂蛋白胆固醇、载脂蛋白B、非高密度脂蛋白和高密度脂蛋白/甘油三酯,一方面是小球藻对肠道膳食脂质吸收有抑制作用,另一方面其提供血清中的类胡萝卜素可能对内源性脂质的吸收具有抑制作用。这些研究凸显了小球藻作为肥胖管理功能性食品的潜力。

2.9 神经保护和抗抑郁活性

小球藻对神经细胞具有保护活性,且无细胞毒性,主要是丰富的酚类物质发挥了较大的抗氧化活性^[45]。Mohamed等^[73]研究发现,小球藻对尼古丁导致小鼠神经组织损伤具有修复作用,主要表现为抗氧化酶活性升高和抗细胞凋亡,并可显著挽救脑组织免受尼古丁引起的相关组织改变,延缓氧化应激诱导的细胞死亡,其机制主要是源于小球藻中丰富的 β -1,3-葡聚糖、抗坏血酸、叶黄

素等物质可以刺激神经营养功能,增强健康大脑活动,促进抗氧化状态,减少炎症症状,降低死亡率。

近年来,抑郁症等精神疾病的发病率逐年上升,已成为社会的一大负担。由于抗抑郁药物的副作用较多,开发基于天然物质的补充疗法迫在眉睫。Panahi 等^[74]让重度抑郁症患者服用 6 周小球藻补充剂后,患者焦虑抑郁程度下降,为小球藻在辅助抗抑郁方面的应用开辟了新思路。

2.10 益生元活性

商业益生元通常是碳水化合物,可作为益生菌微生物的底物。就其对生物体的用途而言,小球藻细胞中最重要的碳水化合物为 β -1,3-葡聚糖,可作为细菌的能量来源,易于在结肠中发酵。小球藻的益生元活性能够显著促进双歧杆菌的生产以及乳酸和乙酸的产生,同时联合双歧杆菌能够显著降低高脂大鼠血清、肝脏和心脏中的甘油三酯浓度^[75]。尤其值得注意的是,小球藻的添加能够刺激有益菌丰富度的增加,同时抑制机会性致病菌的增加(例如肠杆菌科、肠球菌属和葡萄球菌属)^[76]。因此,小球藻可以成为一种实用的食品成分,通过改善肠道微生物环境来增强健康,预防疾病。

3 小球藻在食品中的应用

随着生活水平的日益提升,人们对膳食营养的要求也不断提高。作为具有独特色泽、风味与营养成分的小球藻,越来越多地作为营养强化剂添加到食品中。中国于 2012 年正式批准蛋白核小球藻作为新资源食品。

作为营养强化剂,小球藻的传统食用方法多以单一粉末和片剂为主。近年来,因小球藻诸多健康益处不断被发现,陆续被广泛应用于主副食饮料以及功能食品中。将小球藻添加到这些食品中,可以生产出外观精美、具有市场创新性的产品,同时提高食品中功能性成分的含量,特别是必需氨基酸、抗氧化剂、多不饱和脂肪酸和维生素等。此外,添加小球藻还可以提高益生菌在酸奶等发酵乳制品中的存活率^[77]。

除了强化营养,小球藻还能够改善食品的感官特性。小球藻的高蛋白特性使其能够用作乳化剂。来自小球藻的多糖提取物等可用于食品的增稠和凝胶化,而来自小球藻的天然色素可增强食品颜色参数,并改善质地^[78]。Yasin 等^[79]研究表明,添加普通小球藻后,仿制奶酪的物理特性有所改善,外观、口感和质地均得到提升。将小球藻添加到小米饼干中,饼干质地更佳,蛋白质、总酚含量显著增加,此外,可使饼干表现出更好的体外消化率和较低的预期血糖生成指数。该研究彰显了基于小球藻的小米饼干在食品工业中的应用价值,有助于食品企业拓展其产品范围,不仅面向关注健康的人群,也适用于糖尿病患者^[80-81]。值得注意的是,由于小球藻品种多样,细胞壁

厚且包含部分蛋白,小球藻在食品中的实际应用效果与藻种、培养方式和加工方式有关。例如,高压均质化、珠磨和脉冲电场破碎处理能够显著提高小球藻蛋白质的溶解度和消化率,并降低了乳化液滴的尺寸,增强了起泡能力和稳定性,同时降低了最低凝胶浓度并提高了持油能力^[82]。

尽管小球藻的各种生物活性被不断发现与报道,但小球藻藻种多样,成分复杂,各种活性均未有明确的作用机制,成为小球藻在食品领域开辟下游应用的重要挑战。因此,小球藻生物活性的研究应进一步进行化学成分的定量定性分析,分离单个组分并确定其功能特性将是未来研究的主要目标。另一方面,目前对其研究剂量和使用时间范围宽泛,有效剂量尚未确定。此外,由于纤维含量高,可能无法耐受较高剂量,从而导致消化不良。因此,未来有必要结合动物及人类实际食用量进行定量定时定性研究,并更大范围地开展临床验证。同时,有必要对小球藻的包埋、破壁、混合天然香料等方法进行感官评估,以掩盖其不良味道,拓展其在不同食品中的应用。

4 总结与展望

随着对小球藻研究的深入,其在食品、医药、饲料中的应用预计将显著增长。尽管人们对其生物活性化合物和营养价值已有了解,但许多领域仍未得到充分探索,未来的研究对于充分发挥这种微藻在各个行业中的潜力至关重要。

小球藻未来发展的关键之一在于其大规模生产,从而满足日益增长的需求。目前自养生产的小球藻成本较低,但产品质量(活性成分、重金属)等方面普遍低于异养生产。然而,异养培养的小球藻尽管安全性较高,成本仍较高,且产品叶绿素及颜色等仍与自养小球藻存在一定差距。另外,从目前商业应用场景来讲,欧盟以及美国等地区对小球藻的有机认证要求,工业化异养方式不能满足。因此,未来研究应侧重于通过开发创新的反应器设计和针对不同小球藻菌株的营养配方来解决这些瓶颈。例如提高开放系统的光利用效率和改进收获系统,有针对性提高多糖等有价值生物活性物质含量。同时,为了更好地降低成本,可以针对饲料以及能源应用领域,将小球藻生产与废物回收和可再生能源相结合,为提高生产的可持续性和降低资源密集度开辟新路。

合成生物学的最新发展为小球藻的开发应用提供了新机遇。但是,合成生物学在小球藻产业的应用仍然面临着重大障碍,特别是在确保稳定的改造不会损害细胞生长或产量方面。另一方面,小球藻实际规模化生产仍因转基因政策限制问题难以在食品等领域应用。因此,未来合成生物学的研究可以聚焦使小球藻成为生产药物化合物、酶和其他高价值产品的生物工厂,从而进一步扩

大其工业和治疗应用。

小球藻营养成分丰富,作为营养补充和治疗用途具有广阔的应用前景。然而,关于优化生产方式,提高生物利用度,解析营养成分和生物活性机制,丰富临床试验验证等进一步的研究至关重要。未来的研究还应探索生物技术和可持续性方面的创新应用,发挥小球藻在应对全球健康、粮食安全和环境可持续性挑战中的关键作用。

参考文献

- [1] BEIJERINCK M W. Cultuurversuche mit zoochlorellen, lichenengonidien und anderen niederen[J]. Algen Bot Ztg, 1890, 48: 725-772, 781-788.
- [2] FALCÃO R L, PINHEIRO V, RIBEIRO C, et al. Nutritional improvement of fresh cheese with microalga *Chlorella vulgaris*: impact on composition, structure and sensory acceptance[J]. Food Technology and Biotechnology, 2023, 61(2): 259-270.
- [3] MASOUMIFESHANI B, KENARI A A, SOTTORFF I, et al. Identification and evaluation of antioxidant and anti-aging peptide fractions from enzymatically hydrolyzed proteins of *Spirulina platensis* and *Chlorella vulgaris*[J]. Marine Drugs, 2025, 23(4): 162.
- [4] SPÍNOLA M P, COSTA M M, PRATES J A M. Enhancing digestibility of *Chlorella vulgaris* biomass in monogastric diets: strategies and insights[J]. Animals, 2023, 13(6): 1 017.
- [5] 王宝贝, 蔡舒琳, 李丽婷, 等. 小球藻在食品中的应用研究进展[J]. 食品工业科技, 2017, 38(17): 341-346.
WANG B B, CAI S L, LI L T, et al. Applications of *Chlorella* in food industry[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(17): 341-346.
- [6] ZHANG K, SUN B J, SHE X X, et al. Lipid production and composition of fatty acids in *Chlorella vulgaris* cultured using different methods: photoautotrophic, heterotrophic, and pure and mixed conditions[J]. Annals of Microbiology, 2014, 64(3): 1 239-1 246.
- [7] 苏杭, 吕俊平, 刘琪, 等. 一株高脂土壤小球藻的分离鉴定及脂质分析[J]. 水生生物学报, 2018, 42(4): 811-818.
SU H, LV J P, LIU Q, et al. Identification and lipid analysis of an oil-producing *Chlorella* strain from soil[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2018, 42(4): 811-818.
- [8] 崔岩, 边建文, 刘瑛, 等. 微藻多糖及其衍生物在农业领域的研究进展[J]. 土壤通报, 2023, 54(5): 1 226-1 236.
CUI Y BIAN J W, LIU Y, et al. Research progress of microalgae polysaccharides and their derivatives in agriculture[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(5): 1 226-1 236.
- [9] 熊斯微, 范泽, 张海涛, 等. 小球藻的营养价值及其在水产动物饲料中的应用[J]. 饲料工业, 2024, 45(6): 7-13.
XIONG S W, FAN Z, ZHANG H T, et al. Nutritional value and applications in aquatic animal feed of *Chlorella*[J]. Feed Industry, 2024, 45(6): 7-13.
- [10] CARNOVALE G, ROSA F, SHAPAVALL V, et al. Starch rich *Chlorella vulgaris*: high-throughput screening and up-scale for tailored biomass production[J]. Applied Sciences, 2021, 11(19): 9 025.
- [11] DE CARVALHO SILVELLO M A, GASPAROTTO G A, FERREIRA G F, et al. Nutrient optimization strategy to increase the carbohydrate content of *Chlorella vulgaris* and evaluation of hydrolysis and fermentation performance[J]. BioEnergy Research, 2023, 16(4): 2 058-2 067.
- [12] ZANCHETTA E, DAMERGI E, PATEL B, et al. Algal cellulose, production and potential use in plastics: challenges and opportunities[J]. Algal Research, 2021, 56: 102288.
- [13] HIDHAYATI N, PURBA L D A, FIRMAN N F A, et al. Current status and future prospects of *Chlorella* as raw materials in cosmeceuticals: cultivation, extraction, and commercial applications[J]. Journal of Applied Phycology, 2025, 37(1): 343-354.
- [14] BITO T, OKUMURA E, FUJISHIMA M, et al. Potential of *Chlorella* as a dietary supplement to promote human health[J]. Nutrients, 2020, 12(9): 2 524.
- [15] DEL MONDO A, SMERILLI A, SANÉ E, et al. Challenging microalgal vitamins for human health[J]. Microbial Cell Factories, 2020, 19(1): 201.
- [16] CHINI ZITTELLI G, LAUCERI R, FARALONI C, et al. Valuable pigments from microalgae: phycobiliproteins, primary carotenoids, and fucoxanthin[J]. Photochemical & Photobiological Sciences, 2023, 22(8): 1 733-1 789.
- [17] BAZARNOVA J, SMYATSKAYA Y, SHLYKOVA A, et al. Obtaining fat-soluble pigments: carotenoids from the biomass of *Chlorella microalgae*[J]. Applied Sciences, 2022, 12(7): 3 246.
- [18] 王宝贝, 加晶, 孙辉, 等. 烘焙温度对小球藻脂肪酸、色素及乙醇提取物抗氧化活性的影响[J]. 食品与机械, 2018, 34(7): 29-33.
WANG B B, JIA J, SUN H, et al. Effects of roasting temperature on the fatty acid, pigment and ethanol-extracts and their antioxidant activities in *Chlorella pyrenoidosa*[J]. Food & Machinery, 2018, 34(7): 29-33.
- [19] MAURÍCIO T, COUTO D, LOPES D, et al. Differences and similarities in lipid composition, nutritional value, and bioactive potential of four edible *Chlorella vulgaris* strains[J]. Foods, 2023, 12(8): 1 625.
- [20] KHOLIF A E, OLAFADEHAN O A. *Chlorella vulgaris* microalgae in ruminant nutrition: a review of the chemical composition and nutritive value[J]. Annals of Animal Science, 2021, 21(3): 789-806.
- [21] GADZAMA I U, RAY S, MÉITÉ R, et al. *Chlorella vulgaris* as a livestock supplement and animal feed: a comprehensive review[J]. Animals, 2025, 15(6): 879.

- [22] MENDES A R, SPÍNOLA M P, LORDELO M, et al. Chemical compounds, bioactivities, and applications of *Chlorella vulgaris* in food, feed and medicine[J]. Applied Sciences, 2024, 14(23): 10810.
- [23] LUCAKOVA S, BRANYIKOVA I, HAYES M. Microalgal proteins and bioactives for food, feed, and other applications [J]. Applied Sciences, 2022, 12(9): 4 402.
- [24] AZIZI R, BAGGIO A, CAPUANO E, et al. Protein transition: focus on protein quality in sustainable alternative sources[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2025, 65(18): 3 401-3 421.
- [25] SCHAAFSMA G. The protein digestibility-corrected amino acid score (PDCAAS): a concept for describing protein quality in foods and food ingredients: a critical review[J]. Journal of AOAC International, 2005, 88(3): 988-994.
- [26] SÁ A G A, HANG J Y, JARDINE L, et al. How different amino acid scoring patterns recommended by FAO/WHO can affect the nutritional quality and protein claims of lentils[J]. Sustainable Food Proteins, 2023, 1(2): 59-73.
- [27] SIAHBALAEI R, KAVOOSI G, NOROOZI M. Manipulation of *Chlorella vulgaris* polyunsaturated ω -3 fatty acid profile by supplementation with vegetable amino acids and fatty acids[J]. Phycological Research, 2021, 69(2): 116-123.
- [28] MORADI-KHEIBARI N, AHMADZADEH H, LYON S R. Correlation of total lipid content of *Chlorella vulgaris* with the dynamics of individual fatty acid growth rates[J]. Frontiers in Marine Science, 2022, 9: 837067.
- [29] ZHANG J, WU G C, LU F M, et al. Enhancing EPA and DHA synthesis in acetic acid-supplemented *Chlorella vulgaris*: a combined strategy of chemical mutagenesis and adaptive laboratory evolution[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 515: 163473.
- [30] HASAN M M, VIJAY K, KUMARI S, et al. Exogenous calcium provision facilitates the total lipids overproduction without hindering cellular growth in *Chlorella vulgaris*[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2025: 106158.
- [31] MIRZAIE S, TABARSA M, SAFAVI M. Effects of extracted polysaccharides from a *Chlorella vulgaris* biomass on expression of interferon- γ and interleukin-2 in chicken peripheral blood mononuclear cells[J]. Journal of Applied Phycology, 2021, 33(1): 409-418.
- [32] MOREIRA J B, DA SILVA VAZ B, CARDIAS B B, et al. Microalgae polysaccharides: an alternative source for food production and sustainable agriculture[J]. Polysaccharides, 2022, 3(2): 441-457.
- [33] ZANCHETTA E, OLLIVIER M, TAING N, et al. Abiotic stress approaches for enhancing cellulose and chitin production in *Chlorella vulgaris*[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 309: 142969.
- [34] CHEN C Y, ZHAO X Q, YEN H W, et al. Microalgae-based carbohydrates for biofuel production[J]. Biochemical Engineering Journal, 2013, 78: 1-10.
- [35] PRATES J A M. The role of microalgae in providing essential minerals for sustainable swine nutrition[J]. Frontiers in Animal Science, 2025, 6: 1526433.
- [36] SARI L A, MELVA E, ALDILAMETA S, et al. Oxidation stress of UV C light on growth, carotenoids and chlorophyll-a content of *Chlorella vulgaris*[J]. HAYATI Journal of Biosciences, 2025, 32(3): 819-828.
- [37] FARAG M R, ALAGAWANY M, MAHDY E A A, et al. Benefits of *Chlorella vulgaris* against cadmium chloride-induced hepatic and renal toxicities via restoring the cellular redox homeostasis and modulating Nrf2 and NF-KB pathways in male rats[J]. Biomedicines, 2023, 11(9): 2 414.
- [38] IRIANI D, HASAN B, KARNILA R, et al. Biochemical processes of *Chlorella vulgaris* and their impact on chlorophyll quality and antioxidant properties[J]. Journal Ilmiah Perikanan Dan Kelautan, 2025, 17(1): 53-67.
- [39] AGUSTINA S, AIDHA N N, OKTARINA E. The extraction of antioxidants from *Chlorella vulgaris* for cosmetics[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1 011(1): 012057.
- [40] PUTRI T W, NURSIDA N F, RAYA I. Antioxidant activity of *Chlorella vulgaris* used as an antioxidant cream[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1 899(1): 012030.
- [41] WIDYANINGRUM D, PRIANTO A D. *Chlorella* as a source of functional food ingredients: short review[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 794(1): 012148.
- [42] PINTO A S, MAIA C, SOUSA S A, et al. Amino acid and carotenoid profiles of *Chlorella vulgaris* during two-stage cultivation at different salinities[J]. Bioengineering, 2025, 12 (3): 284.
- [43] FERDOUS U T, NURDIN A, ISMAIL S, et al. Evaluation of the antioxidant and cytotoxic activities of crude extracts from marine *Chlorella sp*[J]. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 2023, 47: 102551.
- [44] SAVVIDOU M G, GEORGIOPOULOU I, ANTONIOU N, et al. Extracts from *Chlorella vulgaris* protect mesenchymal stromal cells from oxidative stress induced by hydrogen peroxide[J]. Plants, 2023, 12(2): 361.
- [45] İNAN B, MUTLU B, ÇAKIR R, et al. From ice to neurons: investigating the neuroprotective effects of *Antarctic microalgae Chlorella variabilis* and *Chlorella pyrenoidosa* extracts[J]. 3 Biotech, 2024, 14(10): 250.
- [46] QIU Y H, GAO X X, CHEN R X, et al. Metabolomics and biochemical insights on the regulation of aging-related diabetes by a low-molecular-weight polysaccharide from green microalga *Chlorella pyrenoidosa*[J]. Food Chemistry: X, 2022,

- 14: 100316.
- [47] HAMOUDA R A, EL LATIF A A, ELKAW E M, et al. Assessment of antioxidant and anticancer activities of microgreen alga *Chlorella vulgaris* and its blend with different vitamins[J]. *Molecules*, 2022, 27(5): 1 602.
- [48] BARGHCHI H, DEHNAVI Z, NATTAGH-ESHTIVANI E, et al. The effects of *Chlorella vulgaris* on cardiovascular risk factors: a comprehensive review on putative molecular mechanisms[J]. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 2023, 162: 114624.
- [49] MOHSENI R, ARAB SADEGHABADI Z, KARIMI J, et al. *Chlorella vulgaris* supplementation attenuates the progression of liver fibrosis through targeting TGF- β -signaling pathway in the CCl₄-induced liver fibrosis in rats[J]. *Toxin Reviews*, 2021, 40(4): 1 347-1 355.
- [50] TAKEKOSHI H, FUJISHIMA M, MIYAZAWA T, et al. Simultaneous intake of *Chlorella* and ascidian ethanolamine plasmalogen accelerates activation of BDNF-TrkB-CREB signaling in rats[J]. *Molecules*, 2024, 29(2): 357.
- [51] 赵兴吕, 杨雄超, 王奕丹, 等. 食源性生物活性肽免疫调节作用研究进展[J]. *食品与机械*, 2025, 41(12): 180-192.
- ZHAO X L, YANG X C, WANG Y D, et al. Research progress on immunomodulatory effect of food-derived bioactive peptides[J]. *Food & Machinery*, 2025, 41(12): 180-192.
- [52] SAMANTARAY M, SAHOO S, SAHOO D P, et al. Computational identification of dual COX-I and NIK inhibitors from marine microalga *Chlorella vulgaris*[J]. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, 2025, 23 (3): 100531.
- [53] WU S W, LIU H Q, LI S Y, et al. Transcriptome analysis reveals possible immunomodulatory activity mechanism of *Chlorella sp.* exopolysaccharides on RAW_{264.7} macrophages[J]. *Marine Drugs*, 2021, 19(4): 217.
- [54] KWAK J H, BAEK S H, WOO Y, et al. Beneficial immunostimulatory effect of short-term *Chlorella* supplementation: enhancement of natural killer cell activity and early inflammatory response (Randomized, double-blinded, placebo-controlled trial)[J]. *Nutrition Journal*, 2012, 11(1): 53.
- [55] OGNISTAIA A V, MARKINA Z V, ORLOVA T Y. Antimicrobial activity of marine microalgae[J]. *Russian Journal of Marine Biology*, 2022, 48(4): 217-230.
- [56] SHAIMA A F, MOHD YASIN N H, IBRAHIM N, et al. Unveiling antimicrobial activity of microalgae *Chlorella sorokiniana* (UKM2), *Chlorella sp.* (UKM8) and *Scenedesmus sp.* (UKM9)[J]. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2022, 29 (2): 1 043-1 052.
- [57] 徐元柳, 刘迪迪, 王兆丹, 等. 植物提取物抑菌机理及联合现代新兴技术在肉类保鲜中的应用进展[J]. *食品与机械*, 2024, 40(11): 238-244.
- XU Y L, LIU D D, WANG Z D, et al. Research progress on the antibacterial mechanism of natural plant extracts and its application in meat preservation by combining with modern emerging technologies[J]. *Food & Machinery*, 2024, 40(11): 238-244.
- [58] JAFARI S, ALI MOBASHER M, NAJAFIPOUR S, et al. Antibacterial potential of *Chlorella vulgaris* and dunaliella Salina extracts against streptococcus mutans[J]. *Jundishapur Journal of Natural Pharmaceutical Products*, 2018, 13(2): 13226.
- [59] CARBONE D A, PELLONE P, LUBRITTO C, et al. Evaluation of microalgae antiviral activity and their bioactive compounds[J]. *Antibiotics*, 2021, 10(6): 746.
- [60] SHARMA R, MONDAL A S, TRIVEDI N. Anticancer potential of algae-derived metabolites: recent updates and breakthroughs[J]. *Future Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2023, 9(1): 44.
- [61] FERDOUS U T, AHMAD KHAN S, SHAKOOR A, et al. *Chlorella spp.* as an emerging source for anticancer remedy and nutraceuticals: an advance study[J]. *Food Reviews International*, 2026, 42(2): 665-693.
- [62] JANG H J, YIM K J, LEE C S, et al. Anti-cancer and antioxidant properties of methanolic extracts of *Chlorella vulgaris* and *Parachlorella sp.*[J]. *KSBB Journal*, 2022, 37(4): 159-165.
- [63] YUN H, KIM I, KWON S H, et al. Protective effect of *Chlorella vulgaris* against lead-induced oxidative stress in rat brains[J]. *Journal of Health Science*, 2011, 57(3): 245-254.
- [64] MERINO J J, PARMIGIANI-IZQUIERDO J M, TOLEDANO GASCA A, et al. The long-term algae extract (*Chlorella* and *Fucus sp.*) and aminosulphurate supplementation modulate SOD-1 activity and decrease heavy metals (Hg⁺⁺, Sn) levels in patients with long-term dental titanium implants and amalgam fillings restorations[J]. *Antioxidants*, 2019, 8(4): 101.
- [65] LI L, LI W, KIM Y H, et al. *Chlorella vulgaris* extract ameliorates carbon tetrachloride-induced acute hepatic injury in mice[J]. *Experimental and Toxicologic Pathology*, 2013, 65 (1/2): 73-80.
- [66] VIJAYAVEL K, ANBUSELVAM C, BALASUBRAMANIAN M P. Antioxidant effect of the marine algae *Chlorella vulgaris* against naphthalene-induced oxidative stress in the albino rats [J]. *Molecular and Cellular Biochemistry*, 2007, 303(1): 39-44.
- [67] LEE I, TRAN M, EVANS-NGUYEN T, et al. Detoxification of *Chlorella* supplement on heterocyclic amines in Korean young adults[J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2015, 39(1): 441-446.
- [68] PRIAMBODO A F. Identifikasi dan prediksi secara in silico senyawa bioaktif *Chlorella vulgaris* sebagai penghambat α -amilase dan α -glukosidase (DR. IR. muhamad firdaus, MP) [D]. Malang: Universitas Brawijaya, 2021.
- [69] KAEBOON S, SONGSERM R, SUKSUNGWORN R, et al. In vitro antioxidant potential, antidiabetic activities, and GC-

- MS analysis of lipid extracts of *Chlorella* microalgae[J]. BioTech, 2025, 14(2): 46.
- [70] MURAKAMI T, OKAMOTO K, OGAKI M, et al. Effect of *Chlorella* on blood pressure, cerebral stroke lesions, hypertensive vascular changes and life-span in spontaneously hypertensive rats[J]. Nippon Eiyo Shokuryo Gakkaishi, 1987, 40(5): 351-359.
- [71] SUETSUNA K, CHEN J R. Identification of antihypertensive peptides from peptic digest of two microalgae, *Chlorella vulgaris* and *Spirulina platensis*[J]. Marine Biotechnology, 2001, 3(4): 305-309.
- [72] RYU N H, LIM Y, PARK J E, et al. Impact of daily *Chlorella* consumption on serum lipid and carotenoid profiles in mildly hypercholesterolemic adults: a double-blinded, randomized, placebo-controlled study[J]. Nutrition Journal, 2014, 13(1): 57.
- [73] MOHAMED A A, EL BOHY K M, MOUSTAFA G G, et al. Sustained functioning impairments and oxidative stress with neurobehavioral dysfunction associated with oral nicotine exposure in the brain of a murine model of Ehrlich ascites carcinoma: modifying the antioxidant role of *Chlorella vulgaris* [J]. Biology, 2022, 11(2): 279.
- [74] PANAHI Y, BADELI R, KARAMI G R, et al. A randomized controlled trial of 6-week *Chlorella vulgaris* supplementation in patients with major depressive disorder[J]. Complementary Therapies in Medicine, 2015, 23(4): 598-602.
- [75] HYRSLOVA I, KRAUSOVA G, SMOLOVA J, et al. Prebiotic and immunomodulatory properties of the microalga *Chlorella vulgaris* and its synergistic triglyceride-lowering effect with bifidobacteria[J]. Fermentation, 2021, 7(3): 125.
- [76] BAÑARES C, PATERSON S, GÓMEZ-GARRE D, et al. Modulation of gut microbiota and short-chain fatty acid production by simulated gastrointestinal digests from microalga *Chlorella vulgaris*[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2025, 26(6): 2 754.
- [77] WELLS M L, POTIN P, CRAIGIE J S, et al. Algae as nutritional and functional food sources: revisiting our understanding[J]. Journal of Applied Phycology, 2017, 29(2): 949-982.
- [78] WANG C A, ONYEAKA H, MIRI T, et al. *Chlorella vulgaris* as a food substitute: Applications and benefits in the food industry[J]. Journal of Food Science, 2024, 89(12): 8 231-8 247.
- [79] YASIN N M N, SHALABY S M. Quality characteristics of croissant stuffed with imitation processed cheese containing microalgae *Chlorella vulgaris* biomass[J]. World Journal of Dairy & Food Sciences, 2013, 8(1): 58-66.
- [80] SELVARAJU K, MATHUR M, SSM S, et al. Deciphering the effect of *Chlorella minutissima* incorporation in gluten-free millet cookies: physical and functional properties[J]. Algal Research, 2024, 82: 103683.
- [81] 席洁臻, 吴美华, 黄思瑞, 等. 糖尿病营养干预研究进展[J]. 食品与机械, 2024, 40(9): 228-235.
- XI J C, WU M H, HUANG S R, et al. Research progress of nutrition intervention in diabetes mellitus[J]. Food & Machinery, 2024, 40(9): 228-235.
- [82] VAN DE WALLE S, MUYLEAERT K, VAN ROYEN G. Influence of cell disruption on techno-functional properties and digestibility of *Chlorella vulgaris* proteins[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2025, 102: 104023.