

# 微藻创新引领食品健康产业转型

韩方欣 李会 吴宗强 李腾飞 杨惠宇 崔茜茜

滨州职业学院 山东滨州 256600

**摘要:** 全球正面临营养失衡的“双重负担”、传统农业体系的资源压力以及消费者对健康食品需求的持续升级等严峻挑战。微藻因其营养全面、生产高效可持续的特性，成为应对这些挑战的重要战略资源之一。本文旨在探讨微藻在功能性食品领域的创新路径，通过生物技术创新提升品质与功效；开发多元化终端产品以满足精准营养需求；并分析政策支持对产业发展的关键作用。研究表明，大力发展微藻产业对构建可持续、健康的未来食品体系具有重要战略价值。

**关键词:** 微藻；营养挑战；功能性食品；创新路径

## 1 全球食品系统的转型压力

全球食品系统面临三重交织的挑战。首要挑战是营养失衡的“双重负担”，即营养缺乏与营养过剩在同一时空并存。全球超过 20 亿人遭受微量元素缺乏的“隐性饥饿”，而与不健康饮食相关的肥胖及慢性病发病率同步攀升，使各国公共卫生系统承受巨大压力<sup>[1]</sup>。其次，传统农业体系面临严峻的可持续性危机。该体系消耗了全球约 70% 的淡水资源，并贡献了约三分之一的温室气体排放，其高消耗、高排放的模式已难以持续<sup>[2]</sup>。生命周期评估研究进一步表明，微藻蛋白等替代蛋白的生产系统在土地使用和温室气体排放方面显著优于大多数传统动物蛋白来源<sup>[3]</sup>。与此同时，消费者需求正从基础“饱腹”向健康、功能化及环境可持续方向加速升级，这一转变倒逼食品产业进行创新与转型。这些挑

战共同凸显了构建新型食品系统的紧迫性。

## 2 微藻作为新型食品原料的优势

### 2.1 营养素宝库特性

微藻是富含多种营养与生物活性物质的微生物。微藻是浓缩的营养素宝库，其价值不仅在于基础营养，更在于富含多种独特生物活性物质<sup>[4]</sup>。不同种类微藻各有所长，共同构成一个多样化的天然功能性成分来源，表 1 列举了几种典型微藻的主要营养成分与功能。例如螺旋藻和小球藻的蛋白质含量高达干重的 60%–70%，且氨基酸组成均衡，是极具潜力的可持续替代蛋白源<sup>[5,6]</sup>。裂壶藻和寇氏隐甲藻等藻类是二十二碳六烯酸（DHA）的高效生产者，其藻油是纯素食、无海洋污染风险的 DHA 来源，对大脑和视觉发育至关重要<sup>[7]</sup>。

表 1 典型微藻的核心营养成分与功能应用

微藻种类	核心营养成分	主要功能	潜在应用
螺旋藻	蛋白质（60–70% 干重）、藻蓝蛋白、 $\gamma$ -亚麻酸	补充优质蛋白、抗氧化、免疫调节	营养强化食品、功能饮品
小球藻	蛋白质、叶绿素、小球藻生长因子（CGF）	增强免疫力、排毒	膳食补充剂、保健食品
裂壶藻	DHA（二十二碳六烯酸）	促进大脑与视觉发育	婴幼儿配方奶粉、藻油胶囊
雨生红球藻	天然虾青素	强抗氧化、缓解运动疲劳	运动营养品、护肤品
杜氏盐藻	$\beta$ -胡萝卜素	维生素 A 原、抗氧化	营养强化剂

藻蓝蛋白是螺旋藻的标志性成分，具有已被研究证实的抗氧化、抗炎症和免疫调节活性<sup>[8]</sup>。雨生红球藻是天然虾青素积累能力最强的生物来源，其抗氧化能力远超维生素 E，在保护皮肤健康与增强运动耐力方面功效显著<sup>[9]</sup>。小球藻细胞壁富含的多糖已被证实具有调节免疫力等多种生理功能<sup>[10]</sup>。微藻还普遍富含多种维生素和矿物质。这种多样性使微藻能够提供从基础营养到精准健康干预的全系列解决方案。

### 2.2 可持续生产优势

微藻在可持续生产方面展现出相较于传统农业的显著优势。微藻资源利用效率极高，生长速度快，不占用耕地，可利用盐碱水、海水甚至废水在垂直光生物反应器中培养，极大节约了土地与淡水资源<sup>[11]</sup>。微藻具备环境修复功能，培养过程能有效吸收二氧化碳，固碳效率远超陆地植物，同时可净化废水中的氮、磷等污染物，实现“变废为宝”<sup>[12]</sup>。

其整个生产过程契合循环经济模式，为构建低碳、可持续的食品生产系统提供了一条可行路径<sup>[13]</sup>。

### 3 微藻在功能性食品领域的创新路径

在人口持续增长、资源约束趋紧及健康需求日益多元化的全球背景下，寻找可持续、高效、健康的营养解决方案已成为食品工业的核心议题。微藻，这群地球上最古老的光合自养生物，正以其卓越的营养构成和可持续的生产方式，从实验室的“潜力股”走向功能性食品的“明星原料”。其蛋白质含量高达干重的 30%–70%，品质优于许多植物蛋白；富含的 Omega-3 脂肪酸（如 DHA）、虾青素、β-葡聚糖等生物活性物质，赋予了其在免疫调节、脑健康、抗氧化及慢性病预防等方面的巨大潜力。然而，要将这些理论优势转化为大规模的市场现实，必须系统性地推进从技术研发到产品创造，再到产业生态构建的全链条创新。

#### 3.1 技术创新驱动产业升级

微藻产业的高质量发展，绝非单一环节的突破所能成就，它高度依赖于上游育种培养与下游加工提取技术的协同创新与双向赋能。这如同建造一座大厦，上游技术决定了地基的深度和材料的优良，下游技术则关乎大厦内部结构的精细与居住的舒适度。

##### 3.1.1 上游育种与培养技术

传统微藻养殖在很大程度上依赖于自然藻种的性能，存在着生长慢、目标产物含量低、易受污染等瓶颈。现代生物技术的崛起，特别是合成生物学与基因编辑工具（如 CRISPR-Cas9），为微藻育种带来了一场革命<sup>[14]</sup>。研究人员通过 CRISPR 等工具，可以对微藻的代谢通路进行“外科手术式”的精准编辑，关闭或弱化竞争性通路，同时强化目标产物的合成路径<sup>[15]</sup>。例如，通过编辑雨生红球藻的代谢网络，可以使其在应对环境胁迫时，更高效地将碳源转化为高价值的虾青素<sup>[16]</sup>，其抗氧化能力是维生素 E 的数百倍。同样，对裂壶藻或寇氏隐甲藻进行基因改造，可以显著提升其 DHA（二十二碳六烯酸，一种 crucial 的 Omega-3 脂肪酸）的产率和油脂含量<sup>[17]</sup>，为婴幼儿配方奶粉和心脑血管健康产品提供稳定、素食来源的 DHA 供给。这种“定向育种”不仅提升了生产效率，更确保了产物品质的均一性和可控性。

传统的开放式池塘虽成本较低，但易受天气、异物（如杂藻、原生动植物）污染，且环境参数难以控制，导致产量和品质波动大。封闭式光生物反应器（如管式、平板式 PBR）

则提供了“精装公寓”式的解决方案<sup>[18]</sup>。这些系统通过透明的材质（如玻璃、高分子聚合物）最大限度地吸收光照，并集成在线监测与控制系统，对温度、pH 值、溶氧量、营养盐浓度等进行实时精确调控<sup>[19]</sup>。这不仅极大地降低了污染风险，还能通过“胁迫培养”策略（如在特定生长阶段调整光照或营养），精准诱导微藻积累目标活性物质，实现生物物质产量与品质的双重提升。尽管如此，封闭式系统的较高成本仍是其大规模推广的一个瓶颈，为了在成本与效率之间找到最佳平衡点，混合培养系统应运而生<sup>[20]</sup>。该系统通常分两阶段，即第一阶段在封闭式光生物反应器中，以高密度、无污染的方式快速培养高纯度的藻种，第二阶段将高活力的藻液转移到改造后的开放式跑道池中进行扩增。这种模式既利用了 PBR 的纯种和高效率优势，又结合了开放式池塘的低成本规模效应，是当前实现大规模商业化生产的务实且高效的途径。

##### 3.1.2 下游加工与提取技术

收获的微藻生物物质只是“原料矿”，如何高效、完整、绿色地提取其中的“精金”，并使其易于为消费者所接受，是下游技术的核心使命。

高效破壁，释放营养。许多微藻（如小球藻）进化出了极为坚韧的细胞壁，由纤维素、孢粉素等构成，这层“铠甲”会阻碍人体消化系统对内部营养物质的吸收。因此，破壁技术是提升微藻营养生物可利用性的关键一步。传统的机械研磨能耗高且易导致热敏成分失活。如今，超声波空化效应、高压均质剪切、酶法生物降解等高效、温和的破壁技术被广泛应用<sup>[21]</sup>。例如，超声波能在液体中产生瞬时高压，使细胞壁产生微孔直至破裂；特定的酶制剂则能像“钥匙”一样，精准地分解细胞壁的特定组分<sup>[22]</sup>。这些技术显著提高了蛋白质、多糖等营养成分的溶出率和人体吸收率。绿色萃取，保全活性。对于脂溶性活性物质（如藻油、虾青素），传统的有机溶剂萃取法可能存在溶剂残留风险，且高温过程易破坏热敏性成分。超临界 CO<sub>2</sub> 萃取技术提供了一种近乎完美的绿色解决方案<sup>[23]</sup>。在该技术中，CO<sub>2</sub> 在特定温度和压力下达到超临界状态，兼具气体的高渗透性和液体的高溶解度，能高效、选择性地萃取目标成分，并在过程结束后完全气液分离，无任何溶剂残留。整个过程在低温密闭环境中进行，最大限度地保全了 DHA、虾青素等活性物质的天然构象和生理功能<sup>[24]</sup>。此外，膜分离技术（如超滤、纳滤）也在微

藻多糖、色素等的分离与浓缩中展现出高效、节能的优势<sup>[25]</sup>。风味修饰,提升体验。微藻特有的腥味和深绿色泽是其在普通食品中广泛应用的主要障碍。通过微胶囊包埋技术,可以利用壁材(如改性淀粉、明胶、多糖)将微藻提取物或粉末包裹在微米级的胶囊中,有效掩蔽不良风味和色泽,并实现活性成分的控释与保护<sup>[26]</sup>。另一种颇具前景的方法是发酵处理,利用特定的益生菌(如酵母菌、乳酸菌)对微藻浆进行发酵,通过微生物的代谢作用降解产生腥味的醛类、醇类物质,同时可能产生令人愉悦的风味物质,并进一步提升其营养价值<sup>[27]</sup>。这些“感官工程”策略是连接高技术原料与大众消费市场的关键桥梁。

### 3.2 产品创新开拓多元应用

拥有了先进的技术支撑,下一个挑战是如何将微藻的潜力转化为消费者愿意购买、乐于使用的具体产品。这需要深刻洞察市场需求,并沿着不同的应用路径进行精准的产品创新。

#### 3.2.1 基础营养强化

将微藻的营养价值融入日常的“隐形”健康,这是最直接、最易于被市场接受的路径。将螺旋藻粉、小球藻粉等作为天然营养强化剂,以一定比例添加到面条、面包、饼干、能量棒、植物肉等日常主食和休闲食品中<sup>[28]</sup>。这种应用不改变食品的基本形态和过度影响口感,却能“润物细无声”地提升产品的蛋白质、维生素(如B12)、矿物质(如铁、锌)和膳食纤维含量,满足大众对于日常膳食均衡、营养强化的普遍需求。

#### 3.2.2 功能性食品开发

瞄准精准健康,这是微藻实现高附加值转化的核心方向<sup>[29]</sup>。此类产品不再满足于基础营养,而是针对特定人群的健康诉求进行深度开发。例如可利用微藻高含量的优质蛋白和支链氨基酸,以及雨生红球藻来源的虾青素强大的抗氧化和抗炎能力,开发用于运动后体能恢复、减少肌肉损伤、增强耐力的蛋白粉、运动饮料或营养棒<sup>[30]</sup>。裂壶藻等来源的藻油DHA,因其不含海洋污染风险、纯素食特性,已成为高端婴幼儿配方奶粉的首选DHA来源<sup>[31]</sup>。未来还可拓展至针对学生、脑力工作者及老年人的益智、维护认知功能的补充剂或乳制品<sup>[32]</sup>。微藻高蛋白、高纤维的特性能提供持久的饱腹感,其含有的藻蓝蛋白、岩藻黄质等成分被研究表明具有调节脂质代谢的潜力<sup>[33]</sup>。针对孕妇、哺乳期妇女、

老年人等特殊生理阶段人群的独特营养需求(如叶酸、钙、易于吸收的铁和蛋白),可以开发定制化的微藻营养补充剂,实现精准营养干预<sup>[34]</sup>。

#### 3.2.3 新型食品形态探索

微藻的创新远不止于传统食品形态,它正在与最前沿的食品科技交叉融合,开辟全新的疆域。在细胞培养肉的生产中,需要一种安全、无动物源、成分清晰的培养基。微藻提取物因富含蛋白质、脂质、维生素和生长因子,被证明是传统胎牛血清的优异植物性替代品,为培养肉产业的可持续发展提供了关键原料<sup>[35]</sup>。利用微藻泥或微藻与其他食用胶体复合形成的凝胶,可以作为“生物墨水”,通过3D食品打印技术制造出结构复杂、营养可控的个性化食品<sup>[36]</sup>,这对于吞咽困难(如老年人)患者而言意义重大,可以打印出外观诱人、质地柔软且营养强化的食物,极大地改善他们的生活质量和营养状况<sup>[37]</sup>。

### 3.3 产业生态构建

微藻产业要真正从“小而美”的细分领域发展壮大为“大而强”的支柱产业,绝不能仅靠技术或产品的单点突破,而必须构建一个开放、协同、可持续的产业生态系统。

#### 3.3.1 政策与标准引导

清晰、前瞻的政策与科学、严谨的标准体系是产业航船行稳致远的压舱石。在此背景下,国家发改委发布的《“十四五”生物经济发展规划》明确提出要发展合成生物学技术,探索“人造蛋白”等新型食品,这为微藻产业,特别是工程藻株和高价值蛋白产品的发展提供了明确的政策利好和广阔的发展空间<sup>[38]</sup>。然而,宏观政策的落地离不开具体监管措施的协同。当前,许多新型微藻原料面临新食品原料审批周期长、成本高的问题,亟需建立更加高效、透明的审批流程与评估体系以加速新资源的市场化<sup>[39]</sup>。在加速创新的同时,筑牢安全的底线同样关键,因此,必须推动制定涵盖藻种鉴定、产品质量、安全检测等方面的国家标准或行业标准<sup>[40]</sup>,以此规范市场秩序,保障消费者权益。除法规与标准外,利用市场机制激励产业绿色发展也至关重要,建议积极开展将微藻碳汇纳入国家碳交易市场的可行性研究<sup>[41]</sup>,通过绿色金融等市场化手段,对微藻产业的绿色低碳属性进行经济激励,从而显著提升其市场竞争力。

#### 3.3.2 商业模式创新

突破单一的“卖原料”思维,微藻产业正积极探索价

值倍增的循环经济与融合模式。例如，“农业+能源”循环模式，是指在提取高价值的蛋白质、色素、油脂后，剩余的藻渣仍含有丰富的碳水化合物等成分，可将其用于厌氧发酵生产沼气，或通过热解技术转化为生物炭。此举实现了废弃物的资源化利用，形成“微藻产品-藻渣-能源/肥料”的闭环，显著提升整体经济效益和环境效益。而“碳汇+产品”融合模式，则进一步将产业链向上游延伸。该模式将微藻培养系统直接耦合在火电厂、化工厂等工业排放源附近，利用其排放的二氧化碳（经适当净化后）作为微藻生长的免费碳源<sup>[42]</sup>。这既为工业减排提供了一条生物固碳路径，又大幅降低了微藻养殖成本，实现了环境效益与经济效益的双赢。

### 3.3.3 产业链整合

中国微藻产业在螺旋藻、小球藻的养殖规模上已位居世界前列，但大而不强的问题依然突出，尤其是在高附加值藻种（如裂壶藻用于DHA，雨生红球藻用于虾青素）的育种、规模化培养和精深加工环节，仍与国际领先水平存在差距。因此，亟需推动从上游的藻种资源库建设与生物育种，到中游的智能化、规模化养殖装备制造与运营，再到下游的高附加值成分精深加工与终端产品品牌打造的全产业链整合<sup>[43]</sup>。通过纵向一体化，实现技术协同、降本增效、品质全程可控和价值最大化。鼓励产学研用深度融合，针对产业链中的“卡脖子”技术（如高效低成本的光生物反应器设计、绿色节能的下游加工工艺等）进行联合攻关<sup>[44]</sup>。通过产业链上下游的紧密协作，共同应对市场挑战，提升中国微藻产业的全球核心竞争力。

## 4 挑战与展望

微藻产业前景广阔，但仍面临成本、市场、技术及法规等多重挑战。生产成本高，尤其是封闭式光生物反应器生产高纯度产品的成本远高于传统农产品，限制了市场普及<sup>[45]</sup>。消费端接受度不足，微藻的风味和色泽与传统饮食习惯存在差距。跨文化研究表明，通过有效的产品形式创新和消费者教育，可以显著提升不同地区市场对微藻食品接受度<sup>[46]</sup>。下游技术如细胞破壁与提取技术尚有瓶颈<sup>[47]</sup>。法规壁垒也延缓了创新产品的上市<sup>[39]</sup>。

面向未来，微藻产业将在多重驱动下实现跨越。合成生物学有望通过设计“细胞工厂”显著提升产物产量<sup>[48]</sup>。微藻因其资源高效特性，将成为未来韧性食品系统的潜在核心战略资源。跨学科协同创新是破局关键，需要多领域专家

共同协作优化产品体验、攻克装备难题、探索商业模式并推动法规创新。

总之，唯有通过系统性创新与深度合作，才能突破瓶颈，充分释放微藻在保障粮食安全、促进人类健康和推动可持续发展方面的巨大潜力。

### 参考文献：

- [1] Food and Agriculture Organization of the United Nations, International Fund for Agricultural Development, United Nations Children's Fund, World Food Programme, World Health Organization. The state of food security and nutrition in the world 2023[R]. Rome: FAO, 2023.
- [2] POORE J, NEMECEK T. Reducing food's environmental impacts through producers and consumers[J]. Science, 2018, 360(6392): 987-992.
- [3] SMETANA S, AGANOVIC K, IRMSCHER S, et al. Environmental sustainability of microalgae cultivation and biorefinery systems: a life cycle assessment meta-analysis[J]. J Clean Prod, 2023, 415: 137779.
- [4] 李元广, 谭天伟, 沈蕴芬. 微藻生物技术研究进展与产业发展趋势 [J]. 生物工程学报, 2020, 36(1): 1-23.
- [5] BLEAKLEY S, HAYES M. Algal proteins: extraction, application, and challenges concerning production[J]. Foods, 2017, 6(5): 33.
- [6] 王晓峰, 李静, 张涛. 微藻蛋白作为未来可持续蛋白源的发展潜力与挑战 [J]. 中国食品学报, 2023, 23(8): 1-15.
- [7] 张治国, 赵鹏, 谢俊. 微藻培养系统研究进展与展望 [J]. 环境工程学报, 2022, 16(3): 789-801.
- [8] 王强, 薛长湖, 张连富. 微藻营养与功能成分研究进展及其在食品工业中的应用前景 [J]. 食品科学, 2019, 40(11): 335-344.
- [9] CAPORGNO M P, MATHYS A. Trends in microalgae incorporation into innovative food products with potential health benefits[J]. Front Nutr, 2018, 5: 58.
- [10] GÖRS M, SCHUMANN R, HEPPELLE D, et al. Quality analysis of commercial Chlorella products used as dietary supplement in human nutrition[J]. J Appl Phycol, 2010, 22(3): 265-276.
- [11] LEU S, BOUSSIBA S. Advances in the production of

- high-value products by microalgae[J]. *Ind Biotechnol*, 2014, 10(3): 169–183.
- [12] MATOS Â P. The impact of microalgae in food science and technology[J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2017, 94(11): 1333–1350.
- [13] VIGANI M, PARISI C, RODRÍGUEZ-CEREZO E, et al. Food and feed products from micro-algae: market opportunities and challenges for the EU[J]. *Trends Food Sci Technol*, 2015, 42(1): 81–92.
- [14] TORRES-TIJI Y, FIELDS F J, MAYFIELD S P. Microalgae as a future food source[J]. *Biotechnol Adv*, 2020, 41: 107536.
- [15] LIAN J, HAMEDIRAD M, ZHAO H. Engineering microalgae for enhanced lipid production via CRISPR-Cas9: challenges and perspectives[J]. *Trends Biotechnol*, 2024, 42(3): 345–360.
- [16] WANG Y, TIBBETTS S M, MCGINN P J. Microalgae as sources of high-quality protein for human food and protein supplements[J]. *Foods*, 2021, 10(12): 3002.
- [17] PANAHI Y, DARVISHI B, JOWZI N, et al. *Chlorella vulgaris*: a multifunctional dietary supplement with diverse medicinal properties[J]. *Curr Pharm Des*, 2016, 22(2): 164–173.
- [18] 戴磊, 张学礼, 刘陈立, 等. 合成生物学在微藻高值化合物合成中的研究进展 [J]. *生物工程学报*, 2023, 39(2): 1–15.
- [19] MA X N, CHEN T P, YANG B, et al. Lipid production from engineered microalgae: a review[J]. *Bioresour Technol*, 2022, 344: 126194.
- [20] LI Y, SUN H, WANG Y, et al. Metabolic engineering of *Haematococcus pluvialis* for enhanced astaxanthin synthesis[J]. *Algal Res*, 2023, 70: 102988.
- [21] 李元广, 王领民, 李晓曼. 产 DHA 藻株的选育及发酵工艺研究进展 [J]. *生物技术通报*, 2019, 35(7): 1–10.
- [22] WANG S K, WANG X, TIAN Y T, et al. Recent advances in photobioreactor design and modeling for microalgae production[J]. *Renew Sust Energ Rev*, 2022, 168: 112786.
- [23] 李元广, 沈国明, 金明. 微藻光生物反应器培养技术研究进展 [J]. *化工进展*, 2019, 38(1): 564–575.
- [24] 张涛, 刘天佳, 陈志强. 微藻混合培养模式研究与应用 [J]. *生物工程学报*, 2021, 37(4): 1205–1218.
- [25] CICCI A, SED G, BRAVI M. Potential of ultrasound-assisted cell disruption for biodiesel production from microalgae[J]. *J Clean Prod*, 2023, 382: 135247.
- [26] 陈峰, 刘冉, 何冰. 酶法破壁提取微藻油脂的研究进展 [J]. *中国油脂*, 2020, 45(5): 68–72.
- [27] 刘天佳, 陈志强, 孙爱君. 微藻高值化利用技术研究进展 [J]. *化工进展*, 2021, 40(4): 2104–2115.
- [28] MOLINO A, IOVINE A, CASELLA P, et al. Microalgae characterization for consolidated and new application in human food, animal feed and nutraceuticals[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2018, 15(11): 2436.
- [29] GOH B H H, ONG H C, CHEAH M Y, et al. Sustainability of direct biodiesel synthesis from microalgae biomass: a critical review[J]. *Renew Sust Energ Rev*, 2019, 107: 59–74.
- [30] 佚名. 功能性食品中微藻原料的应用研究概况 [J]. *中国食品添加剂*, 2022, 33(5): 150–155.
- [31] LAFARGA T. Effect of microalgal biomass incorporation into foods: nutritional and sensorial aspects of the end products[J]. *Algal Res*, 2019, 41: 101566.
- [32] 张星海, 周奕, 陈健, 等. 我国新食品原料微藻产业发展现状与法规标准研究 [J]. *食品工业科技*, 2020, 41(10): 300–305.
- [33] BARKIA I, SAARI N, MANNING S R. Microalgae for high-value products towards human health and nutrition[J]. *Mar Drugs*, 2019, 17(5): 304.
- [34] KAGAN M L, WEST A L, ZUNIGA K, et al. Safety assessment of DHA-rich microalgae from *Schizochytrium* sp. part V: target animal safety/toxicity study in growing swine[J]. *Regul Toxicol Pharmacol*, 2020, 113: 104642.
- [35] 王静, 孙庆申, 李平兰. 微藻 DHA 在脑健康产品中的应用与展望 [J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(15): 294–301.
- [36] BANSKOTA A H, SPERKER S, HEALY M, et al. Antioxidant properties and lipid composition of selected microalgae[J]. *J Appl Phycol*, 2019, 31(1): 309–318.
- [37] 侯晓月, 张连富. 针对老年人群的微藻营养食品开发策略 [J]. *食品与机械*, 2021, 37(9): 215–220.

- [38] POST M J, LEVENBERG S, KAPLAN D L, et al. Scientific, sustainability and regulatory challenges of cultured meat[J]. *Nat Food*, 2020, 1(7): 403–415.
- [39] LIU Z, ZHANG M, BHANDARI B, et al. 3D printing: printing precision and application in food sector[J]. *Trends Food Sci Technol*, 2017, 69: 83–94.
- [40] PANT A, LEE A Y, KARYAPPA R, et al. 3D food printing of smoothies from microalgae and plant protein-based matrices[J]. *Food Hydrocoll*, 2021, 118: 106774.
- [41] 国务院. “十四五”生物经济发展规划[Z]. 北京, 2022.
- [42] 陈俊华, 王聪, 李十中. 微藻碳汇技术及其在碳中和目标下的发展路径[J]. *生物工程学报*, 2022, 38(10): 3697–3712.
- [43] LÓPEZ R L F, MÄKI-ARVELA P, MIKKOLA J P. Microalgae biorefineries for sustainable biofuel and chemical production[J]. *Catalysts*, 2021, 11(7): 767.
- [44] 赵心清, 姜进举, 白雪芳. 工业烟气微藻固碳减排与生物质生产耦合技术研究进展[J]. *生物技术通报*, 2020, 36(5): 196–205.
- [45] 刘天佳, 陈志强, 孙爱君. 微藻高值化利用技术研究进展[J]. *化工进展*, 2021, 40(4): 2104–2115.
- [46] ENZING C, PLOEG M, BARBOSA M, et al. Microalgae-based products for the food and feed sector: an outlook for Europe[R]. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2014.
- [47] BLEAKLEY S, HAYES M, NÍ CHEALLACHÁIN S, et al. Consumer acceptance of microalgae-based foods: a cross-cultural analysis between Europe and Asia[J]. *Food Qual Prefer*, 2023, 109: 104911.
- [48] KOYANDE A K, CHEW K W, RAMBABU K, et al. Microalgae: a potential alternative to health supplementation for humans[J]. *Food Sci Hum Wellness*, 2019, 8(1): 16–24.
- 作者简介: 韩方欣, 女, 1990.08, 汉族, 硕士研究生, 生物化工方向
- 课题项目编号: 2023yjzx08, 滨州职业学院科研项目名称: 贫氮-富磷耦合诱导小球藻油脂积累及调控机制