

提高小球藻蛋白质含量方法的研究进展

陈欣

福建师范大学生命科学学院, 福建 福州, 350117;

摘要: 小球藻 (*Chlorella*) 是一种单细胞绿藻, 因其高蛋白含量 (干重 40%–60%) 和丰富的必需氨基酸组成, 被视为可持续蛋白源的理想候选。本文综述了提高小球藻蛋白质含量的方法, 包括优化营养条件、改变培养策略和添加植物激素, 并探讨了废水在生产小球藻蛋白质中的应用, 为提高小球藻蛋白含量提供理论支持和参考。

关键词: 小球藻蛋白质; 培养条件; 培养策略; 植物激素; 废水

DOI: 10. 69979/3029–2808. 25. 07. 055

1 前言

随着全球人口增长和传统畜牧业的环境压力加剧, 开发可持续的替代蛋白源成为迫切需求。小球藻具有光合效率高、培养周期短、营养可调控等优势, 但其蛋白质含量受遗传背景和环境因素的双重影响。如何通过生物技术手段突破天然限制, 提高蛋白质的定向积累, 是当前研究的重点。

2 提高小球藻蛋白质含量的方法

2.1 优化营养条件

2.1.1 光照条件

在培养小球藻的过程中, 光照条件不仅会影响小球藻的光合作用和生长繁殖, 而且会影响其组成成分和代谢途径。光照条件包括光照强度、光照周期、光的颜色、光照模式等。光照强度和光照周期会影响小球藻的蛋白质含量和产量。Gao 等人^[1]在不同光照强度和光照周期的条件下, 设置 5 组光照强度, 当光强为 $50 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 时, 其蛋白质含量最高。还发现在光照强度为 $150 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 的条件下, 设置 5 组光照周期, 在光照周期为 20L: 4D 时, 蛋白质含量最高。

不同波长光对小球藻蛋白质含量和产量也有影响。Baidya 等人^[2]研究了不同波长 Led 光对小球藻生长和主要成分的影响, 发现在对数生长期, 相比于其他光处理, 蓝色 Led 光的蛋白质含量最高, 这是因为与红光相比, 蓝光增加了 14C 掺入到氨基酸组成的蛋白质中, 这特异性地促进了蛋白质合成的速率。

光照模式同样会影响蛋白质的合成, 根据 Sarkar^[3]等人的报道, 他们在固定模式、可变模式和连续模式三种模式下培养小球藻, 发现蛋白质含量在可变模式下最

高 (68%)。

2.1.2 碳源

微藻通常可以根据吸收的碳源类型进行分类, 即自养型、异养型和混养型。自养生物通过在光照下以二氧化碳作为碳源来进行光合作用。异养生物利用有机碳底物作为其碳源和能源。那些既能吸收有机碳源又能吸收无机碳源的生物被称为混养生物。

不同碳源浓度会影响蛋白质的含量。根据 Li 等人^[4]的研究, 在 1% CO_2 条件下, 经过 31 轮的适应性进化, 获得一株进化小球藻。在不同 CO_2 条件下研究了进化小球藻的生长曲线和生物质组分。结果发现当 CO_2 浓度逐渐增加时, 总蛋白含量从 26% 上升到 38.38%。

不同的碳源种类会影响蛋白质的含量, 在异养培养中, 根据 Chen 等人^[5]的研究, 评估不同的碳源哪种更适合作为小球藻的碳源。结果发现小球藻不能利用甘油和蔗糖作为生长的碳源, 在通过比较葡萄糖和乙酸钠时, 发现使用葡萄糖的最大蛋白含量和最大蛋白生产率最高, 所以葡萄糖更适合作为小球藻的碳源。

2.1.3 氮源

氮主要负责调节微藻的蛋白质合成和生长代谢物, 其影响总体生长速率。李兴锐等^[6]通过探究发现, 在特定的硝酸钠浓度区间内, 小球藻的蛋白质含量会随着硝酸钠浓度的提升而增长, 其蛋白质含量由 26.1% 增至 37.4%。蔡易辉^[7]通过研究发现, 使用不同氮源培养小球藻也会影响其蛋白质的含量, 最高为 59.36%。这一结果证实了氮源种类对微藻蛋白质含量的显著影响。不同氮源的利用效率和代谢途径的差异可能导致了蛋白质含量的显著变化。

通过加入蛋白质水解物, 亦能有效提升产量及其所含蛋白质的总量。Koochi 等^[8]发现在对数生长期的球

藻中加入柑橘皮蛋白水解物, 可以使其生物量和蛋白质含量超过原来的 2 倍和 1.25 倍。以上例子证实了通过外源性添加特定蛋白质水解物, 可以有效促进小球藻的生长和蛋白质合成, 从而提高其产量和营养价值。

2.2 培养策略

培养策略的不同亦会对蛋白质的合成过程产生显著影响。李兴锐等^[9]采用了分阶段培养策略, 先在低氮条件下培养, 随后转入高氮环境, 通过这种方式显著提升了蛋白质的含量, 最终达到了 53.8%。Xie 等^[9]基于异养微藻的过补偿效应, 提出浓度转移法促进小球藻蛋白质合成。具体而言, 首先缺氮的一阶段诱导小球藻进入饥饿状态, 此时细胞数量仅略有增长; 随后, 富氮的二阶段, 显著提升了小球藻的生物量及蛋白质含量, 最终使得蛋白质含量达到 44.3%。Xiao 等^[10]创新性地提出了一种两阶段培养策略, 旨在提升小球藻的生物量和蛋白质合成效率。第一阶段, 采用富碳低氮的培养条件, 有效提高了小球藻的生物量, 并诱导其进入氮饥饿状态, 为后续的蛋白质合成奠定基础。第二阶段, 利用过补偿效应, 通过调整至富氮低碳的培养条件, 促使小球藻大量合成蛋白质, 最终实现了蛋白质含量高达 59.75% 的显著成果。以上的培养策略说明分阶段培养是提高蛋白质含量的重要方法。

2.3 添加植物激素

诸多研究揭示, 植物激素能够通过调节代谢途径, 增加小球藻中的蛋白质含量。此外, 通过两种植物激素的协同作用, 可以进一步促进小球藻细胞的增殖以及蛋白质的累积。吕富等^[11]发现添加适宜的奈乙酸, 可以将小球藻蛋白质的含量从 44.68% 提高至 57.31。邓丽婵等^[12]发现添加细胞分裂素提高了 25.3% 的蛋白质积累量。以上几种植物激素均能促进蛋白质合成, 还有学者发现了不同激素间的协同作用。有研究发现, 实验中用到的油菜素内酯均与生长素有协同作用, 促进小球藻生长和代谢产物积累。生长素可以增强油菜素内酯对小球藻蛋白质积累的刺激作用^[13]。其还在后来的研究中发现, 外源细胞分裂素的添加可能改变了激素平衡, 增加了小球藻的内源性油菜素内酯的水平。在培养基中存在油菜素类固醇时, 细胞分裂素对蛋小球藻蛋白质含量的刺激作用增强。

3 利用废水生产小球藻蛋白质

来自各行各业的废水, 例如工业废水、农业废水以及生活污水等, 可以作为培养小球藻的理想基质, 废水的资源化利用不仅可以有效地处理废水, 而且还能产生有价值的小球藻蛋白质。Bai 等^[14]将小球藻接入根霉发酵废水中进行脱氮耦合, 其蛋白生产蛋白质产量为 19.94 g/L, 生产的小球藻拥有较为全面的营养成分和丰富的氨基酸种类, 且容易消化吸收, 所以其可以用作优质的蛋白饲料或饲料添加剂。

4 结论与展望

小球藻是高质量蛋白的重要来源, 但其蛋白质含量受到遗传背景和环境因素的双重影响, 限制了小球藻蛋白质的含量。通过优化培养条件和改变培养策略, 以及添加植物激素可以有效解决这一问题, 还可以利用废水来降低生产小球藻蛋白质的生产成本。

未来提高小球藻蛋白质的研究可能注重多学科交叉与技术创新。遗传层面, 可能利用基因编辑技术定向调控氮代谢通路, 有望突破蛋白质积累的天然瓶颈。环境调控方面, 可能开发智能生物反应器, 实现光照模式、碳氮供给的动态优化, 可进一步提升蛋白质合成效率。在未来, 随着科技的创新, 小球藻蛋白有望成为替代蛋白产业的核心原料, 推动食品、饲料及生物材料领域的绿色转型。

参考文献

- [1]GAO K, XUE C, YANG M, et al. Optimization of light intensity and photoperiod for growing *Chlorella sorokiniana* on cooking cocoon wastewater in a bubble-column bioreactor [J]. *Algal Research*, 2022, 62(102612).
- [2]BAIDYA A, AKTER T, ISLAM M R, et al. Effect of different wavelengths of LED light on the growth, chlorophyll, β -carotene content and proximate composition of *Chlorella ellipsoidea* [J]. *Heliyon*, 2021, 7(12): e08525.
- [3]SARKAR S, MANNA M S, BHOWMICK T K, et al. Effect of different illumination patterns on the growth and biomolecular synthesis of isolated *Chlorella Thermophila* in a 50 L pilot-scale photobioreactor [J]. *Process Biochemistry*, 2021, 109(87-97).

- [4]LI D, ZHAO Q. Study of carbon fixation and carbon partitioning of evolved *Chlorella* sp.'s strain under different carbon dioxide conditions [J]. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2023, 48(102655).
- [5]CHEN C-Y, LU J-C, CHANG Y-H, et al. Optimizing heterotrophic production of *Chlorella sorokiniana* SU-9 proteins potentially used as a sustainable protein substitute in aquafeed [J]. *Bioresource Technology*, 2023, 370(128538).
- [6]李兴锐, 王文睿, 张永奎, et al. 氮浓度对异养小球藻生长及蛋白质含量的影响[J]. *食品工业科技*, 2012, 33(08): 222-4.
- [7]蔡易辉. 碎米水解液异养培养小球藻过程控制及其蛋白质富集机制研究 [D], 2023.
- [8]KOOCHI Z H, JAHROMI K G, KAVOOSI G, et al. Fortification of *Chlorella vulgaris* with citrus peel amino acid for improvement biomass and protein quality [J]. *Biotechnology Reports*, 2023, 39(e00806).
- [9]XIE T, XIA Y, ZENG Y, et al. Nitrate concentration-shift cultivation to enhance protein content of heterotrophic microalga *Chlorella vulgaris*: Over-compensation strategy [J]. *Bioresource Technology*, 2017, 233(247-55).
- [10]XIAO X, ZHOU Y, LIANG Z, et al. A novel two-stage heterotrophic cultivation for starch-to-protein switch to efficiently enhance protein content of *Chlorella* sp. MBFJNU-17 [J]. *Bioresource Technology*, 2022, 344(126187).
- [11]吕富, 林伟峰, 石祥根. NAA 对小球藻生长及叶绿素和蛋白质含量的影响 [J]. *盐城工学院学报(自然科学版)*, 2006, 02): 42-5.
- [12]邓丽婵, 赵雄峰, 黄小波, et al. 6-BA 对小球藻生长及蛋白质合成的影响 [J]. *怀化学院学报*, 2018, 37(11): 77-81.
- [13]BAJGUZ A, PIOTROWSKA-NICZYPORUK A. Synergistic effect of auxins and brassinosteroids on the growth and regulation of metabolite content in the green alga *Chlorella vulgaris* (Trebouxiophyceae) [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2013, 71(290-7).
- [14]BAI Y, LI Y, TANG Y, et al. *Rhizopus oryzae* fermentation wastewater nutrient removal coupling protein fodder production by employing *Chlorella pyrenoidosa* [J]. *Bioresource Technology*, 2022, 362(127858).