

纳米技术和化学工程作为生物化处理微藻的工具： 在生物资源管理中的应用

穆尼巴·沙阿，安努尔·哈立德，穆罕默德·菲尔道斯

隶属机构：巴基斯坦科技部

摘要：微藻是具有各种生物技术应用的动态生物资源。近年来，该应用的范围已扩大到包括营养保健食品、药品、农业和工业产品、环境修复和生物能源生产。同时，用于预期应用的微藻生物加工方法和技术也在不断发展。然而，要充分发挥微藻的潜力，仍需取得重大进展。这篇综述讨论了当前的方法，以提高藻类原料的有效性，方法是使用具有成本效益和环境可持续的技术对藻类原料进行创新的生物加工，以将其应用于治疗和生物资源管理。其中，关于为生物能源和生物资源保护而生产增值产品的讨论阐述了微藻作为解决现代世界能源危机的生物库的潜力。

关键词：微藻；化学工程；甲烷

Nanotechnology and Chemical Engineering as A Tool to Bioprocess Microalgae for Its Applications in Therapeutics and Bioresource Management

Muneeba Shah, Annuar Khalid, Muhammad Firdaus

Affiliation: Department of Science and Technology, Pakistan

Abstract: Microalgae are a dynamic biological resource with various biotechnological applications. During recent times, the scope of this application has expanded to include nutritional health foods, pharmaceuticals, agricultural and industrial products, environmental remediation and bioenergy production. At the same time, the methods and technologies to bioprocess microalgae for the intended applications have also evolved. However, there are still significant developments needed to reach the full potential of microalgae. The presented review discusses current methodologies to improve the effectiveness of algal feedstocks by bioprocessing them innovatively with cost-effective and environmentally sustainable techniques for their applications in therapeutics and bioresource management. The first section discusses the diversity of microalgae and its applications. In following sections, bioprocessing microalgae for their applications in therapeutics focusing on the efficacy of algae-mediated metallic nanoparticles against microbial infections and cancer is discussed. In addition, a discussion on bioresource management to produce value-added products for bioenergy and bioresource conservation elaborated the potential of microalgae as a biological reservoir to resolve the energy crisis for the modern world.

Keywords: Microalgae; chemical engineering; methane

引言：

藻类是一组重要的生物，分别包括进行光合作用的原核生物和真核生物，例如蓝细菌和绿藻。这些真核和原核微生物通常存在于湖泊和池塘中，与其他微生物相比，它们的生长倍增时间相对较短，并为水生动物提供了全新的浮游生物。藻类还负责将大约 50% 的总氧气供应到地球大气中。

微藻是具有非常简单的生长需求（光、糖、CO₂、N、P 和 K）的微生物，与其他原料相比，它可以在更短的时间内大量生产脂质、蛋白质和碳水化合物。五个遥远的进化谱系由真核藻类群代表，其中很少有原生生物，通常记录为真菌和原生虫。

藻类物种的总数被评估在一到一千万之间，而其中大部分是由微藻组成的。它们广泛存在于海水和淡水中。

栖息地多样性导致微藻物种的生化多样性。因此，微藻的生化多样性被用于许多生物技术和工业应用，例如补充剂、化妆品、制药、营养保健品、食品、饲料和生物燃料。目前，微藻被认为是生产生物燃料的有力候选者。与其他原料相比，它具有提供无毒、环保、可再生的生物燃料的潜力，因为它具有高生物质生产力、高生物燃料产量，并且不与传统农业竞争耕地。除了生物燃料，许多高价值的非能源产品可以从微藻中提取。当然，微藻显示出多种蛋白质（6–52%）、脂质（7–23%）和碳水化合物（5–23%）含量，具体取决于菌株在适当培养条件下产生生物成分的性质和能力。许多微藻菌株在商业上用于生产多糖、包括维生素、多不饱和脂肪酸和蛋白质在内的营养物质，用于制药和食品工业。此外，微藻是天然抗氧化剂和生物活性化合物的来源，可用于药用。除了提供有益成分外，微藻的优势在于它们有可能在无机条件下在自然环境中生存，通过光合作用将二氧化碳转化为有用的增值资源。

一、微藻的生化多样性

微藻的化学生物多样性在决定它们在生物技术、工业、农业和环境用途方面的潜在应用方面起着至关重要的作用。微藻提供了广泛的系统发育广度，其反映描绘了与细胞壁、色素、脂肪酸、油、脂质、碳氢化合物、光合产物、粘液以及初级和次级生物活性化合物相关的广泛化学生物多样性。下面讨论了微藻的生物活性化合物及其特性：

脂质、脂肪酸和油：脂质、脂肪酸和油是微藻的关键成分。然而，一些物种仅限于碳氢化合物生产。这种藻类的一个例子是来自叶绿素的葡萄球菌。它能够生产90%的干重仅由碳氢化合物组成。微藻还产生大量稀有和常见的甾醇，包括：软骨甾醇（叶绿素、类眼虫）、地甾醇（甲藻）、胆固醇（蓝藻、红藻）、表油菜甾醇（硅藻）、斜角甾醇（叶绿素）、麦角甾醇（叶绿素、红藻、euglenoids），poriferasterol（chlorophytes, chrysophytes），和谷甾醇（blueobacteria, chlorophytes, xanthophytes）。另一个重要的生物成分是omega-3。由于其药用重要性，它的需求量很大，微藻是仅次于鱼类的主要生产者。

微藻脂质以甘油和C4–C22长碳链脂肪酸的酯形式存在。蓝细菌主要以产生多不饱和脂肪酸而闻名，而微藻含有单饱和脂肪酸和饱和脂肪酸以及多不饱和脂肪酸。不同藻类群中的脂肪酸分布差异很大。绿藻含有亚麻酸，硅藻含有棕榈酸、十六烷酸和多烯酸。红藻具有较高的花生四烯酸、棕榈酸、油酸和亚油酸值。金黄植物的分布中含有大量的脂肪酸。少数脂肪酸是独特的，仅由少

数物种产生，例如二十碳五烯酸（C20：5）和二十二碳六烯酸（C22：6）酸由数量有限的红色和绿色微藻所产生。然而，它们也由少数种类的甲藻、隐藻、棱藻和硅藻所合成。

二、藻类的潜在应用

藻类是一种有前途的、可持续的和长期的生物质来源，以及食物、饲料和燃料以及其他生物产品，这些特性引起了极大的关注。这个景点涵盖了各种各样的相关福利。为了生产各种产品，在生物加工之后或之前使用了许多微藻。下面讨论了一些有益于全球人类的藻类应用：

生物燃料生产：微藻提供了许多不同类型的可再生生物燃料，包括甲烷（厌氧消化）、氢气（生物光解）、乙醇（使用微藻进行酒精发酵）、液态烃（布氏葡萄球菌），最重要的是甘油三酯（脂质）和脂肪酸甲酯（FAME）燃料（脂质的酯交换）。此外，与传统的陆地油料作物相比，微藻在每单位土地面积上生产更多的油是众所周知的。

以生物柴油形式使用生物燃料的历史可以追溯到20世纪后期，并且随着时间的推移，这项技术正在不断发展。对于生物柴油合成，甘油三酯被转酯化产生脂肪酸甲酯和甘油。因此，微藻被认为是生物柴油生产的最佳候选者之一，因为与普通柴油相比，净二氧化碳或硫对大气的贡献最小。除了酯交换，科学家们还尝试了生物工程，并证明生物工程和酯交换的结合可以从异养微藻中生产出高质量的生物柴油。

废水的生物修复：藻类在营养丰富和/或废水中茁壮生长，例如市政、农业、工业和牲畜废水。藻类不仅在营养丰富的水域中产生最高的生物量，它们还净化了水。微藻已被证明可用于处理农业、工业和市政废水。通过光合作用产生氧气是微藻对环境的主要贡献。然而，兼性池和高速氧化池更适合通过微藻产生最大量的氧气。此外，搅拌高速池塘以最大限度地提高微藻产量和最大限度地减少生化需氧量的可能性。在这两个系统中，都以绿色微藻为主，例如小球藻、栅藻和Ankistrodesmus。这些池塘系统产生的生物质可用作动物饲料，而干燥的生物质可用于养分循环和回收。微藻也被用于减少工业过程中的废热和二氧化碳。

三、目前生物加工微藻的方法

有几种方法可用于生物化处理微藻以获得增值产品。通常讨论的增值产品是生物燃料和具有营养和制药重要性的生物成分。对于沼气生产，批量厌氧消化被广泛使用。对于制药、保健品、人类食品和化学品中的应用，

增值产品通过使用常用记录方法进行分离/提取。已经努力通过开发转基因方法来处理微藻，将它们转化为“绿色细胞工厂”，从而提高这些产品的产量。增加增值产品产量的其他技术包括增加盐度和/或温度。

实践中的技术易于使用，并且在某些情况下可重现。然而，上述用于生物化处理微藻的技术速度慢并且需要大量样品。克服这些瓶颈，需要经济上可实现的技术以及实际应用。此外，这些微藻产品的生物加工技术应该能够在商业上扩大规模，以增加来自增值产品的藻类的市场潜力。因此，在这篇综述中，我们讨论了一些改进的生物化处理微藻的方式，例如使用纳米技术和化学工程的纳米技术。

四、生物加工技术及其应用

在用于生物加工微藻的许多纳米技术和化学工程技术中，我们选择藻类介导的银纳米粒子及其治疗活性、纳米材料（量子点）补充和厌氧消化以保护生物资源。

五、藻类介导的脂质生产

藻类系统能够改变生物燃料的前景以及治疗和其他应用，因为它有资格成为其直射阳光捕获实体，并能够将其转化为增值产品，如脂质和生物成分。然而，有几个限制藻类熟练度的因素，并减缓了微藻的开发和大规模应用。限制之一是带宽（红色和蓝色），可能是限制性的，并且基于自然光合作用捕获机制。由于藻类遗传操作的挑战和修改自然光合系统的困难，随着时间的推移，以基因工程方法为重点的改进变得有限。微藻在光捕获方面的改进以满足能源需求在实践中与太阳能和纳米技术等其他技术一起使用。可以通过使用光捕获纳米材料并将它们整合到微藻系统中来利用这一优势。将光转化为化学物质表现出从生命科学中获得最佳效果的能力，以及材料设备在捕获可用于此目的的更宽光谱范围内可访问的光方面的熟练程度。

石墨烯量子点（GQD）成为纳米技术中最有前途的应用之一，与其前体石墨烯（二维至零）相比，其带隙减小。量子限制和边缘效应在为非照明石墨烯提供所需带宽的荧光方面发挥着重要作用。GQD的带隙取决于由量子限制效应定制的尺寸，当它们的直径减小到10 nm以下时会突出显示。GQD可以通过化学动力学反应和/或钝化表面缺陷而发光。蓝色和绿色GQD已在文献中报道并用作生物成像或其他实验条件。然而，GQD的特点是无毒，被认为是医学和生物应用中的潜在候选物。

实验证明，在无毒限度或低剂量范围内的特定类型纳米材料可以加速植物的生物光合作用过程。例如，郑等人。证明二氧化钛纳米粒子可用于增强菠菜叶的光合

活性。研究还证明，随着光合作用的改善，植物各部分的大小显著增加，例如：香菜、大蒜、洋葱、黄瓜和番茄。纳米材料刺穿植物细胞的能力也引起了科学家的注意，将这些材料也用于其他生物系统。这一知识还导致处理微藻以使用纳米材料生产微藻和微藻产品。除了一些具有启发性的结果外，不同纳米材料对微藻的浸渍也会引起细胞毒性。量子点也被归类为潜在的重金属毒性起源。与其他量子点（QD）相比，GQD被认为具有优越的特性，因为它们具有以下特性：光稳定性、生物相容性和低毒性。

改善微藻生物质生产的最重要目标之一是提高脂质产量。基于微藻和纳米技术相结合的方法，纳米粒子的补充可以分为两种模式来增强微藻的脂质生产：

间接使用 NPs 作为脂质诱导剂：高浓度的纳米颗粒会阻碍光向微藻细胞进行光合作用的转移。为了避免这个问题，已经以 NPs 的形式间接使用 NPs，并在含有藻类培养物的生物反应器的外表面安装局部表面等离子共振（LSPR）。光强的控制由 LSPR 的自由电子的集体振荡提供。一项类似的研究表明，通过使用通过放置在生物反应器外表面的 Ag-NP 悬浮液散射的蓝光，莱茵衣藻的细胞生长显著增加。

Eroglu 等人在光生物反应器周围组合或单独使用球形 Ag-NPs 和 Au 纳米棒培养了普通小球藻，报告称与空白生物反应器相比，生物量显著增加。他们还报告了叶绿素和类胡萝卜素的大量增加，从而导致微藻细胞吸收光的水平升高。除了有效生长外，NP 悬浮液被回收超过 5 个循环，没有任何毒性或污染迹象。值得注意的是，观察到光通量强度和波长可以通过纳米粒子的大小和浓度来调节，避免光抑制并刺激含有不同光色素的特定微藻物种的生长。

直接使用纳米颗粒作为脂质诱导剂：已经进行了关于在微藻培养物中直接使用纳米颗粒以增加除脂质之外的生物量的研究。Iron-NPs 已被积极用于脂质积累。另一项研究表明使用 MgSO₄ 作为叶绿素合成的潜在活化剂并增加光合活性。据报道，二氧化硅纳米颗粒可增加生物量，而 TiO₂ 则用于分析藻类培养物中的脂质生产。这项研究的结果表明，氧化应激（脂质积累触发）可以通过 NPs 的剂量和有效分散来控制。

六、不同藻类的沼气（甲烷）产量

根据微藻在连续反应器中进行藻类消化期间的甲烷产量和体积生产率数据，藻类作为 AD 工艺的底物可以分为三个遥远的组。第一组包括甲烷产量大于 0.3 L/g-VS 的藻类，包括具有高甘露醇含量的棕色巨藻

Macrocystis pyrifera、蓝藻节旋藻、绿色微藻小球藻和栅藻。第二组的甲烷产量约为 0.2 L/g-VS，包括棕色大型藻类海带和绿色大型藻类石莼、毛藻和毛藻。最后，第三组的甲烷产量低于 0.15 L/g-VS，包括棕色巨藻马尾藻、红色巨藻江蓠和绿色巨藻浒苔。

另一个重要的结论是 *M. pyrifera* 的 AD 在 OLR 值高达 10 g-VS/L-day 时是稳定的。2.7 L (CH₄)/L (消化器) - 天的甲烷体积生产率达到了高值，从而减少了消化器所需的体积和资本成本。最后，应用先进的消化反应器、藻类与其他底物的共消化、藻类水解和细胞液体的提取以及藻酸盐提取残留物的消化等几种方法，显著提高了甲烷产量、产率和整个过程效率。

七、厌氧消化作为微藻养分回收和甲烷生产的工艺增强方法

在许多其他基质中，藻类物质也已用于通过厌氧消化生产沼气。先前研究的报告证明，小球藻、三角褐指藻、斜栅藻和最大螺旋藻产生了合理数量的沼气。藻类作为废水处理的潜在目标，往往会积累大量的营养物质，尤其是氮和磷。因此，在废水中生长的藻类物质在厌氧消化时会回收大量的营养物质。

厌氧细菌分解有机碳，其中含有聚合物，主要产生甲烷、二氧化碳和无机氮和磷。厌氧消化的常规应用涉及在单个生物反应器中利用形成酸和甲烷的微生物进行底物消化的批处理过程。然而，厌氧消化的阶段分解提供了显着的结果，并且被许多研究报告。一项关于阶段限制厌氧消化的研究报告了更高水平的总磷、活性磷、沼气和挥发性脂肪酸等生物产品。

八、结论

微藻是植物界的一个多样化群体，具有多种生化和生理特性，有可能改变以生物燃料、生物能源、无土作物、饲料、生物活性成分以及最重要的生物修复为重点的研究领域。正如文献中所讨论的，藻类对传染病的功效的讨论很少，而它在控制由微生物感染引起的发病率和死亡率方面具有无限的可能性。藻类为研究人员提供了一个巨大的画布来描绘他们的想法。纳米技术与微藻的整合之所以受到关注，是因为具有相似的兴趣，并且具有可观的应用，可以造福人类。藻类衍生的金属纳米颗粒描述了微藻抑制微生物活性以提供灭菌条件的能力。使用藻类介导的金属纳米粒子的抗癌和抗病毒活性研究不足。此外，微藻被认为是多种产品的重要原料。此外，

微藻的种植被公认为生物技术行业利润最高的业务。

微藻的多样性是如此之大，以至于总是存在新应用和产品的可能性。使用微藻的生物修复应用也是一个主要研究领域。已经讨论了减轻环境影响和废水处理（水管理），并发现藻类可以与沼气生产一起进行生物处理以进行养分回收和再循环。

参考文献：

[1]Velmurugan R, Incharoensakdi A. Nanoparticle mediated NADPH regeneration for enhanced ethanol production by engineered *Synechocystis* sp. PCC 6803. bioRxiv. 2019.

[2]Xu Y, Wang X, Fu Y, et al. Interaction energy and detachment of magnetic nanoparticles-algae. Environ Technol. 2019; 29:1 - 7.

[3]Zhang X, Yan S, Tyagi RD, et al. Biodiesel production from heterotrophic microalgae through transesterification and nanotechnology application in the production. Renew Sustain Energy Rev. 2013; 26: 216 - 223.

[4]Sarma SJ, DAS RK, Brar SK, et al. Application of magnesium sulfate and its nanoparticles for enhanced lipid production by mixotrophic cultivation of algae using biodiesel waste. Energy. 2014; 78: 16 - 22.

[5]Golueke CG, Oswald WJ, Gotaas HB. Anaerobic digestion of algae. Appl Microbiol. 1957; 5(1): 47.

[6]Khalid M, Johnson E, Vij A, et al. Anaerobic digestion restricted to phase I for nutrient release and energy production using waste-water grown *Chlorella vulgaris*. Chem Eng J. 2018; 352: 756 - 764.

[7]Ehimen E, Sun Z, Carrington C, et al. Anaerobic digestion of microalgae residues resulting from the biodiesel production process. Appl Energy. 2011; 88(10): 3454 - 3463.

[8]Hernández ES, Córdoba LT. Anaerobic digestion of *Chlorella vulgaris* for energy production. Resources Conserv Recycl. 1993; 9: 127 - 132.

[9]Chakraborty D, Mohan SV. Effect of food to vegetable waste ratio on acidogenesis and methanogenesis during two-stage integration. Bioresource Technol. 2018; 254: 256 - 263.

[10]Ding L, Gutierrez EC, Cheng J, et al. Assessment of continuous fermentative hydrogen and methane co-production using macro- and micro-algae with increasing organic loading rate. Energy. 2018; 151: 760 - 770.