

综述文章

用于微藻利用的烟气CO₂供应方法：综述俞小苏¹, 郭王彪^{2,3,*}, 胡毡⁴, 李鹏程⁴, 张卓蔚⁵, 程军³, 宋春风^{4,*}, 叶庆^{1,*}¹能源学院, 苏州大学, 苏州市 215006, 江苏省, 中国²微生物科学研究院, 耶鲁大学, 西黑文, 康涅狄格州 06516, 美国³清洁能源利用国家重点实验室, 浙江大学, 杭州市 310027, 浙江省, 中国⁴环境科学与工程学院, 天津大学, 天津市 300072, 中国⁵文理学院, 华盛顿大学, 西雅图, 华盛顿州 98105, 美国

* 通讯作者: 郭王彪, wangbiao.guo@yale.edu; 宋春风, chunfeng.song@tju.edu.cn; 叶庆, yeqing@suda.edu.cn

摘要: 利用烟气作为微藻培养碳源的潜力前景广阔。将烟气作为碳源纳入微藻培养过程中可以加速微藻的生长速度, 从而提高集成过程的整体经济可行性。有两个主要烟气来源需要考虑: 燃煤发电厂的烟气, 其 CO₂ 浓度为 12–15 w/w%, 以及煤化工过程的烟气, 其 CO₂ 浓度为 90–99 w/w%。此外, 开放式或密封式微藻培养系统的选择也会影响经济效益。因此, 有四种不同的微藻培养路线需要评估: 原位开放系统、离位开放系统、原位密封系统和离位密封系统。将烟气作为微藻培养中的碳源, 显示出在减少环境影响和成本方面的巨大潜力, 使其成为经济高效的微藻培养的一种非常有前途且可持续的方法。在本综述中, 建议在烟气 CO₂ 浓度较高、目标产品为低利润商品的情况下采用原地开放式路线, 而在烟气 CO₂ 浓度较低、目标产品为高附加值产品的情况下采用非原地密封式路线。

关键词: 烟气; 微藻; 生物精炼厂; 光生物反应器; 工艺流程

1. 前言

二氧化碳 (CO₂) 人为排放量的持续增长被公认为全球气候变化的主要驱动因素之一。CO₂ 捕集技术不仅关注 CO₂ 的封存, 还关注其利用。该技术的发展使化石燃料得以继续使用, 同时保持大气中温室气体浓度的稳定^[1]。微藻作为一种生长周期短的生物质, 被广泛应用于热电联产、食品、化工等领域, 备受关注。这类生物光合效率高, 是理想的碳固定生物。微藻的培养需要消耗外界的 CO₂ 和营养物质, 对环境造成影响。研究发现, 微藻光生物反应器 (photobioreactor, PBR) 系统中的 CO₂ 补充是影响最大的过程, 占积极影响的 60%–90% 以上。烟气是一种废物, 如果排放到大气中, 会造成温室气体排放和气候变化^[2]。因此, 有人建议利用从工业烟气中回收的 CO₂ 排放气体作为微藻培养的碳源^[3]。这种方法有可能提高微藻的生长率。此外, 使用烟气作为碳源可以替代培养过程中对商业碳源的消耗, 从而降低相关成本^[4]。研究表明, 使用烟气中的 CO₂ 每公斤可节省 0.4 €, 大大降低了成本^[5]。通过使用从工业过程中回收的 CO₂ 排放气体, 并回收下游的部分营养物质, 这种方法可为降低微藻生物炼制对环境的影响和成本做出重大贡献。

使用烟气作为微藻培养碳源时仍然存在需要克服的挑战。例如, 烟气的质量和成分可能会根据工业过程的来源和类型而变化。因此, 优化烟气的使用以实现最佳的微藻生长和生产力至关重要。除此之外, 还需要将微藻养殖规模扩大到工业水平, 同时确保可持续性和成本效益。

尽管存在这些挑战,使用烟气作为微藻培养碳源的潜在好处是显著的。烟气的利用可以减少微藻生物炼制对环境的影响,并为微藻培育提供低成本、可持续的碳源。此外,有价值的微藻的生产可以有多种应用,例如生物燃料生产、废水处理以及食品和饲料生产。这些应用为微藻生物炼制提供了广阔的前景,利用烟气作为碳源可以为实现可持续和循环经济做出重大贡献。

烟气和微藻培养过程的结合是一个复杂的系统,需要仔细考虑各种因素,例如烟气来源和目标微藻产品。因此,在下面的章节中,我们将讨论如何有效地结合这两个过程的更详细的工艺流程。

2. 微藻的碳源和培养系统

组合工艺的目标之一是固碳,而碳源的选择取决于烟气的来源。De Assis 等^[6]研究了使用汽油燃烧产生的废气进行碳补充的可行性,发现与使用工业 CO₂ 补充的高效藻类塘相比,碳源不会影响处理效率、产量或生物质成分。燃煤发电厂的烟气 CO₂ 浓度较低(通常在 4%到 20%之间^[2]),而煤化工厂的烟气 CO₂ 浓度较高(通常在 95%以上^[7])。这两种来源对应两种工艺路线:原位模式和离位模式。

原位模式中,微藻培养设施位于气源附近,利用低 CO₂ 浓度的电厂烟气作为碳源。这种气体的运输不太经济,因此将烟气直接通入附近的微藻养殖场是更好的选择。螺旋藻^[8]、小球藻^[9]、衣藻^[10]、栅藻^[11]等微藻菌株可以在该浓度的 CO₂ 通气下快速生长。

在离位模式下,煤化工厂的烟气被进一步加工成其他含碳产品,并作为碳源输送到微藻培养设施。这种模式可使微藻培养基地远离气体源。如果将浓缩的烟气直接泵入微藻培养基,所产生的极高 CO₂ 浓度会对环境造成压力,导致微藻细胞的 CO₂ 固定能力下降。此外,为微藻生长提供的高浓度 CO₂ 利用效率低,导致 CO₂ 供应成本高^[12]。相比之下,使用碳酸氢盐作为供碳材料可显著提高螺旋藻的产量,其碳成本为 \$0.359 kg⁻¹,远低于传统的气泡 CO₂ 方法^[13]。加工后的碳酸氢盐可通过车辆、船舶和其他方法进行长途低成本运输^[12]。因此,对 CO₂ 浓度较高的煤化工烟气进行深加工的经济成本比燃煤电厂的烟气更低。

该模式的一个关键方面是将煤化工烟气转化为碳酸氢盐(商业微藻培养中常用的碳源),从而形成具有相对较高碱度和盐度的微藻培养环境^[14]。尽管许多物种已被证明能够很好地适应这种环境,但对于该模型中使用的候选藻类物种来说,耐受这些条件的能力是必要的。

组合工艺的另一个目标是通过生产微藻生物质来产生经济效益,这使得微藻培养系统的选择成为一个关键的考虑因素。养殖系统的两种主要类型是使用跑道池的开放系统和使用 PBR 的密封系统。开放系统通常具有较低的运营成本,但它们的产量和产品质量也较低。相比之下,密封系统通常具有较高的运营成本,但它们提供更高的产量和更好的产品质量。因此,针对特定微藻产品选择合适的培养系统对经济效益具有重大影响。

然而,只有高价值副产品市场,如食品、营养品、化妆品和药品,才能承受当前微藻生产系统的高生产成本^[15]。此外,值得注意的是,利用烟气产生的微藻副产品并不纯净,可能含有有毒金属和化合物,使其不适合人类直接消费和动物饲料。因此,在将烟气引入微藻培养基之前,有必要去除烟气中的有毒金属,以确保藻类副产物不含金属毒性。

3. 微藻生物精炼路线

微藻 CO₂ 固定培养系统可分为四种路线：原位开放系统、离位开放系统、原位密封系统和离位密封系统。

3.1. 原位开放系统

在这种情况下，燃煤发电厂产生的低浓度烟气经过预处理以减少有毒物质，然后通过管道输送到在气源附近建造的开放式微藻培养设施^[16]。烟气冷却后，通过配气装置泵入开放式微藻培养池中，以支持微藻的生长。由于烟气发生装置靠近微藻培养地点，因此无需进行气体压缩。在曝气过程中，烟气气泡中的部分 CO₂ 被微藻细胞吸收，剩余的大部分 CO₂ 被排入 PBR 周围的环境中。见图 1。



图 1. 燃煤电厂烟气用于开放式跑道池微藻培养的原位开放路线。

Figure 1. In-situ open route of coal-fired power plant for microalgae culture in open raceway pond.

开放式 PBR，尤其是圆形池和跑道池，是最常用的微藻培养装置，占全球微藻生物量产量的 90% 以上^[17]。一些研究人员也采用薄层 PBR 来扩大微藻培养规模^[18-20]。这些系统的优点是建造和运行成本低，易于大规模建造。例如，Zhu 等^[21]在一个 605 m² 的跑道池中，以 10% 的烟气 CO₂ 为补充物，培养了八天，钝顶螺旋藻和螺旋藻属的最终日平均生物量干重分别达到 18.7 g m⁻² d⁻¹ 和 13.2 g m⁻² d⁻¹。然而，它也有一些明显的缺点，如对土地要求高、生物量产量低、易受生物污染以及对环境条件高度敏感。尽管如此，使用开放式 PBR 的微藻培养系统的生产成本大大低于使用封闭式系统的微藻培养系统。该工艺路线的成功运行取决于将 CO₂ 引入开放式 PBR，这可以显著提高整个系统的生物量产量。不过，该工艺中使用的微藻物种必须满足某些要求。首先，它们必须能够承受热电厂烟气中的 CO₂ 浓度、由此导致的介质酸化以及曝气对藻细胞产生的剪切力。其次，它们应能适应不断变化的环境条件和波动，而不会因外来生物入侵而导致生物量大量减少。此外，它们应能有效地进行碳固定^[2,22]。幸运的是，有许多藻类物种在实验室和室外都能满足这些要求。

直接暴露在空气中，开放系统很容易被污染。在开放系统中解决这个问题的一种方法是选择可以在极端条件下生长的微藻，例如可以在大多数入侵生物无法适应的高盐度介质中生长的嗜盐微藻。例如，海洋藻类，如斑绿藻、微绿藻和微拟球藻，采用海水培养基在开放式水道池塘中进行养殖，结果显示未发生生物污染^[23,24]。

由于外部污染风险会影响最终产品的质量，因此不建议使用开放式培养系统生产高价值的微藻产品。然而，由于其运营成本低、易于扩展，开放式系统理论上适合用于培养生产低利润的大宗商品（如燃料、饲料和肥料）的藻种。根据 Ación Fernández 等的研究^[15]，使用跑道池 PBR 培养微藻，并提供淡水、肥料和 CO₂，生物质的生产成本为 €4.5 kg⁻¹。如果使用烟气作为碳源，则可节省购买商业 CO₂ 的费用 €0.3 kg⁻¹，从而将生物质成本降至 €4.2 kg⁻¹。如果将跑道池替换为薄层级联 PBR，成本可低至 €2.0 kg⁻¹。虽然这一成本对于微藻产品来说已经足够低，但与其他具有同等功能的产品相比，如石化柴油（€1.0 kg⁻¹）、豆油和豆粕（€0.5 kg⁻¹）^[17]，仍不具备竞争力。

然而，该工艺路线的原位模式难以实施，因为微藻培养地点必须位于火力发电厂附近。火力发电厂需要大量的水才能运行，通常位于自然水体附近，周围通常是农业或林业用地^[25]。这与开放培养系统对大面积非农业土地的需求相冲突。此外，全年温和稳定的气候是保证生物质生产满足长期连续运行降低成本的期望所必需的。虽然一些研究声称可以利用火电厂烟气余热来确保开放系统即使在寒冷的冬季也能运行^[26]，但还需要更多的研究来证明其可行性。

虽然为了固碳的目的将燃煤电厂烟气引入该工艺路线^[27]，但许多研究表明该系统并没有达到预期的减排效果。在室外培养中，引入 6564 L 烟气和 538 L 的 CO₂ 后，微藻生物量仅增加 0.29 g^[28]。由于烟气进入开放式反应器，大部分 CO₂ 实际上仍然被排放到空气中，因此对碳封存的贡献很小，这意味着该工艺路线更适合以生产生物质产品为主要目的而不是固碳。然而，较低的 CO₂ 利用率明显提高了碳源和曝气的成本，这当然不利于成本控制，因此人们进行了一系列研究来改进该工艺路线。

3.2. 离位开放系统

在这种情况下，气体源和微藻类培养设施之间的距离不受限制，这与前面所述的微藻固定煤化工工厂高浓度的烟气 CO₂ 相对应。高浓度的烟气被进一步处理成碳酸氢盐形式，并通过长途运输到微藻培养基地。碳酸氢盐无需任何处理，可直接用作微藻培养的碳源。由于碳酸氢盐是以肥料的形式添加到培养设施中的，因此与前一种方案中的气体曝气法不同，需要额外的动力来絮凝和沉淀藻细胞。在培养过程中，微藻会消耗培养液中的部分碳酸氢盐，同时产生碳酸盐，并伴随着培养液 pH 值的升高。在随后的收获过程中，至少有一半的碳将以碳酸盐的形式留在流出物中。见图 2。

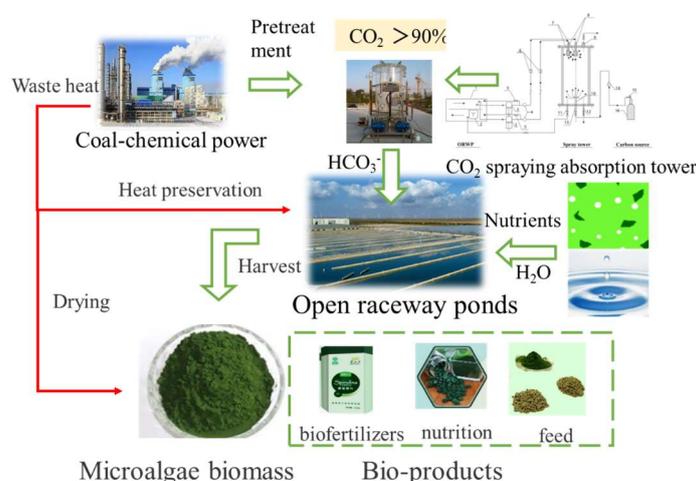


图 2. 煤化工工厂烟气用于开放式跑道池微藻培养的离位开放路线。

Figure 2. Off-situ open route of coal chemical plant for microalgae culture in open raceway pond.

在该系统中, 微藻生长的碳源是碳酸氢盐而不是 CO_2 , 因此 PBR 中的培养基将呈碱性, 并且随着微藻吸收碳酸氢盐并将其转化为碳酸盐, 培养基的碱度将逐渐增加。而且碳酸氢盐中的阳离子也会赋予介质一定的盐度。这些都对微藻物种的耐受性提出了要求^[29]。根据多年的研究, 发现多种微藻物种可以适应这种场景下产生的高盐和高 pH 环境, 如小球藻^[30]、链带藻^[31]、杜氏盐藻^[32]、螺旋藻等^[33]。从海水或盐湖中分离的蓝藻和真核藻类在此技术路线上适应性较好, 可优先考虑。Borovkov 等^[34]在室外开放的矩形池塘中, 通过碳酸氢钠浓度分别为 2.1 g L^{-1} 和 4.2 g L^{-1} 的两种培养基培养, 实现了杜氏盐藻的稳定生产。

离位开放系统中, 介质中的高盐度和高碱度比原位开放系统有效地抑制了外来生物的生长, 从而大大降低了因生物入侵而造成的产量损失或品质下降, 例如浮游动物的捕食或杂菌的污染。高 pH 环境也有利于防止捕食者或其他光合微生物的污染。捕食者的生长是微藻的主要威胁, 在 8.0–9.0 的 pH 范围内可以显著抑制^[35]。

微藻培养主要取决于是否有阳光、水资源和 CO_2 供应。此外, 开放式系统的水分蒸发也是控制成本的一个重要因素, 因此在选址时也要考虑当地水资源的丰富程度和蒸发率^[36]。在这一技术路线中, 微藻培养基地不需要与气源绑定, 这使得选址过程与前一种路线相比略微宽松。然而, 由于开放系统的性质, 地形、气候和水源等重要影响因素仍需仔细考虑。尤其是对水的需求比上一条路线更为迫切, 因为如果不及时补充蒸发损失的水, 会使原本就很高的盐度和碱度更高, 不适合微藻生长^[37]。

除了传统的陆地培养场所外, 最近一些研究人员开始对在海面上种植微藻类感兴趣, 其中两个最重要的考虑因素是可以忽略不计的土地成本和水的无限供应。考虑到这一路线中培养基的盐度水平, 海水恰好是这一系统的良好水源。研究人员还提出了海上浮岛式开放 PBR, 并将其用于微藻培养, 其特点之一是可以利用波浪的动能来搅拌培养基, 从而降低额外搅拌的成本。根据 Yang 等^[38]早前的研究报告, 用海洋藻类生产 1 kg 生物柴油的水足迹为 399 kg, 而淡水藻类为 3726 kg。

从技术经济的角度来看, 只需用碳酸氢盐替代气态碳源, 就能以比原地开放式路线低得多的成本建造和运行非原地开放式路线。首先, 该系统不再需要曝气装置, 这就节省了不小的建设成本, 同时也节省了因曝气而产生的运行成本、维护成本、人工成本等 (总计 $\$5.0\text{--}70 \text{ kg}^{-1}$ ^[13])。其次, 微藻对碳酸氢盐的利用率远高于曝气气泡, 碳源成本将大幅下降。据估计, 使用碳酸氢盐培养螺旋藻的碳源成本为 $\$0.359 \text{ kg}^{-1}$, 远低于 CO_2 曝气的成本 ($\1.47 至 $\$7.33 \text{ kg}^{-1}$)^[13]。

这种系统非常适合生产高附加值的微藻产品, 因为尽管采用开放式培养系统, 但由于污染程度低, 微藻生物质产品的质量可以得到保证。此外, 在该技术路线的培养条件下, 微藻可被视为处于高碱度和高盐度胁迫下, 这两种胁迫可导致藻细胞中脂类、碳水化合物、色素和其他物质的积累, 从而提高生物质在食品、饲料和医药等高价值应用领域的竞争力。Villaró 等^[39]在一个 80 m^2 的开放式跑道池中, 在碳酸氢钠浓度为 16.8 g L^{-1} 的高浓度条件下, 半连续培养的钝顶螺旋藻 BEA005B 产量达到 $30.2 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, 生物质具有很高的食品生产潜力。

如果以生产高价值产品为目标, 藻种选择的重点除了上述的需要适应培养条件外, 还必须要求微藻细胞内目标产品的高含量, 例如用作饲料或食物时的藻细胞要有高蛋白质含量。此外, 考虑到易于分解或提取的需要, 缺乏细胞壁的藻类如原核螺旋藻或真核杜氏盐藻是应该受到青睐的选择^[40]。另一个例子是, 如果作为微藻人类食品出售, 美国食品药品监督管理局批准的藻种螺旋藻属、小球藻属、莱因哈特藻属、红球藻属和杜氏藻属^[41]是必要的候选藻种。

就 CO_2 固定而言, 由于使用了泄漏风险相对较低的碳酸氢盐, 该工艺路线的固碳率远高于原位开放路线。Kim 及其同事报告称, 使用 $5 \text{ g L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$ 培养的杜氏盐藻的碳利用效率最高, 达到 91.4%, 而使用 CO_2 培养时仅为 3.59%^[12]。由于开放系统对环境的影响较小, 该路线应该是四种路线中最环保的生产工艺。此外, Guo 等^[42]在一个 660 m^2 的赛道池塘中培养节旋藻, 并在培养基中添加 $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{NaHCO}_3$ 混合物作为碳源, 结果显示微藻的最大生长速率为 $39.9 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, 这是利用离位开放系统大规模培养节旋藻的一个实例。

3.3. 原位密封系统

在此方案中, 燃煤发电厂的烟气被用作密封式 PBR 中微藻的碳源。在此方案中, 微藻培养场所仍然靠近气体源, 即燃煤发电厂。不过, 微藻不是在露天水池中生长, 而是在密封的 PBR 中生长。烟气也通过管道输送, 然后在压力作用下泵入 PBR, 与藻类细胞混合, 并以曝气气泡的形式进行气体交换。气泡在曝气过程中会损失部分 CO_2 , 然后在 PBR 出口处富集, 由于 PBR 的密封性, 这些残留物可在入口处重新使用, 以提高碳固定率。见图 3。

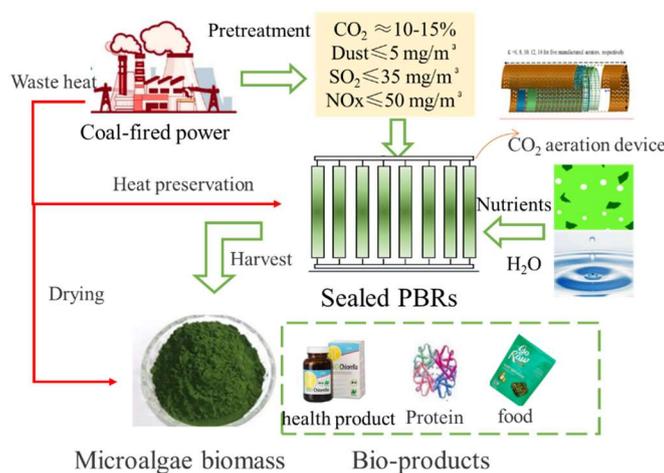


图 3. 燃煤电厂烟气用于密封 PBR 微藻培养的原位密封路线。

Figure 3. In-situ sealed route of coal-fired power plant for microalgae culture in sealed PBRs.

与开放式培养系统相比, 密封式 PBR 在微藻生物质生产方面具有许多优势, 产出的微藻产品产量高、质量好。在平板式 PBR (55 L) 和室外跑道池 (2300 L) 中使用浓度为 1.5% 的 CO_2 (v/v) 培养了两种栅藻藻种。结果表明, 平板式 PBR 的平均生物量生产率为 $19.0 \pm 0.6 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, 而开放式跑道池的平均生物量生产率为 $6.62 \pm 2.3 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ^[43]。然而, 过高的生产成本限制了其应用范围。PBR 的成本约为开放式跑道池的 10.0–100 倍^[13]。微藻培养中常用的 PBR 有很多种, 如平板式 PBR、气提式 PBR、管式 PBR 等。其中, 气升式 PBR 因其出色的气液传质效率而最适合与曝气工艺结合使用^[44], 这对于充分利用烟气中的 CO_2 实现减排至关重要。但从经济角度来看, 板式 PBR 似乎是最佳选择, 因为它的建造成本最低^[5,45], 而这正是决定微藻生物质生产成本的最重要因素 (高达 66.62%–90.29%^[46])。不过, 也有许多研究努力提高 PBR 的气液交换效率, 这似乎是一种能够兼顾经济性和固碳率的合理解决方案。

与开放式系统不同, 密封式系统受气候和地形等限制选址的外部因素的影响较小。不过, 也有一些细节需要考虑。在密封式 PBR 中, 微藻培养液的温度会随着培养过程逐渐升高, 直至不适合细胞生长。因此, 有必要采取适当的冷却措施, 以保证 PBR 的运行。从这个角度来看, 为了减少这部分的能耗, 这种方式不太适合平均温度较低的高纬度或高海拔地区, 因为低纬度地区散热不利。此

外,充足的水资源也是保证冷却水的一个条件,但就该路线而言,孵化地点与同样需要冷却水的发电厂相连,因此无需考虑冷却水的问题。然而,在气候温暖的地区,PBR的内部温度会过高,大规模冷却不经济^[43]。在较凉爽的地区,可能不需要温度调节,因此可以使用室外PBR。

一方面,密封式PBR的单位面积建造成本非常高,约为开放式培养池的3–30倍,估计为 $\$50\text{--}500\text{ m}^{-2}$ ^[41]。为每个PBR设计一个CO₂鼓泡装置大大增加了其制造成本,导致因PBR折旧而产生的至少 $\$1.0\text{ kg}^{-1}$ 的高生产成本^[47,48]。但另一方面,微藻在密封的PBR中产生的生物量可能是开放池塘中的十倍,因此单位重量生物量的最终成本可能正好相反,即使用PBR培养微藻在经济上更具成本效益。据估计,使用管式或板式PBR培养微藻的单位成本可能低至 $\$0.68\text{--}0.7\text{ kg}^{-1}$,而在开放池塘中培养微藻的单位成本最低为 $\$1.28\text{ kg}^{-1}$ ^[48]。另一项研究认为,在平板式PBR中培养微藻的生产成本可能低至 $\text{€}1.6\text{ kg}^{-1}$ ^[5]。

在这一路线中,系统对微藻藻种没有特殊要求,因为所有培养条件都是可以人为控制的。与此相反,应注意一些高附加值产品含量高的微藻,以便能够生产出足够价值的微藻产品,抵消系统运行的高成本。除此之外,还有一些特殊要求,例如,如果培养的藻种能够耐受高达45 °C的温度,则冷却成本为 $\text{€}0.3\text{ kg}^{-1}$ ^[5]。此外,如果为了降低冷却成本而选择寒冷地区作为培养地点,那么显然应选择低温菌株进行筛选^[49]。Sung等^[10]利用聚碳酸酯PBR研究了四种微藻类菌株(莱茵衣藻,小球藻,新绿藻油橄榄属和新绿藻属)对烟气的适应性,结果表明它们都能在这一CO₂水平下持续生长。Choi等^[50]在用10% CO₂通气的管状垂直气泡柱PBR中培养红球藻,发现微藻在KOH缓冲作用下生长速度良好。

PBR的高成本导致更高的生产成本,在不同的研究中从 $\text{€}2.90\text{ kg}^{-1}$ 到 $\text{€}290\text{ kg}^{-1}$ 不等^[47,51,52]。该系统具有生产低成本高产量散装产品的潜力。然而,考虑到PBR中稳定且受控的环境提供了生产高价值产品的可能性,使用该系统来生产高附加值产品(例如食品、营养品甚至药品)显然更经济。也有人建议,如果要在密封的PBR中大规模培养微藻的经济性,那么微藻生物质的价格不应低于 $\text{€}20\text{ kg}^{-1}$ ^[7]。在一项科学研究中,利用燃煤电厂的烟气培养微拟球藻,分析的生物质符合西班牙用作动物饲料的规定^[53]。

密封式PBR的固碳速率比开放式培养系统要大得多,并且大部分补充的碳源可以转化为微藻生物质,主要是因为通过培养基的气体仍然可以被收集并重新泵入策略路由。而且,该途径中的碳源以气态形式被微藻细胞吸收,这种吸收比离子形式的碳酸氢盐要快得多,最终的宏观表现是该途径具有快速且充足的固碳能力。

许多研究利用原位密封路线进行了大规模微藻培养。例如,Ye等^[54]利用CO₂在900 L切圆螺旋流柱式光生物反应器中培养*节旋藻*。Choi等^[55]利用原位密封系统,使用烟气中5%的CO₂,在100 L密封的可扩展串联柱形PBR中培养了工程*蓝藻*菌株,证明了大规模培养的可行性。

3.4. 离位密封系统

在这种方法中,微藻在密封的PBR中培养,碳源来自从煤化工烟气中制取的碳酸氢盐。碳酸氢盐作为营养补充被输送并添加到微藻培养基中,在蠕动泵等动力装置的作用下,微藻培养基在PBR中循环。在循环过程中,微藻吸收碳酸氢盐进行增殖,并将其转化为碳酸盐。因此,系统流出物中仍有大量的碳酸盐和碳酸氢盐,可以将其收集起来,继续补充到新的培养基中重新开始循环。见图4。

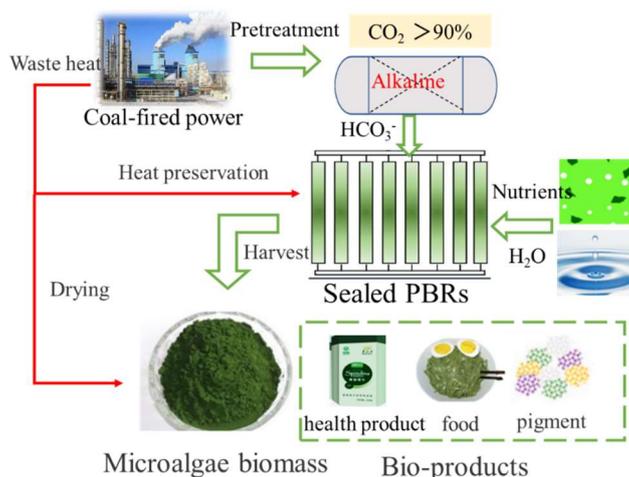


图 4. 煤化工工厂烟气用于密封 PBR 微藻培养的离位密封路线。
 Figure 4. Off-situ sealed route of coal chemical power plant for microalgae culture in sealed PBRs.

该路线采用密封的 PBR，不需要曝气策略，因此候选范围比之前的路线更广泛。然而，考虑到需要利用额外的动力来保持介质循环，一些垂直高度较大的 PBR，例如柱式 PBR，由于需要克服介质的巨大重力势能，似乎增加了其运行成本。水平管式 PBR、带有水平导流板的平板 PBR、光搅拌罐或密封跑道池 PBR 可能更经济高效。然而，垂直高度的限制不可避免地导致建筑面积的增加，体现为建筑成本的增加。对于 PBR 选择，增加的建设成本和降低的运营成本之间的权衡需要额外的数据分析。尽管可以努力降低 PBR 的所有建设和运营成本，但 PBR 仍然占该系统产品成本的很大一部分。因此，该系统只能用于生产对成本不敏感的高价值产品，例如食品和药品。

除了上述传统的 PBR 之外，一种新型的 PBR，即海面漂浮式 PBR 近年来受到越来越多的关注^[56]，并以此为基础开发出了一条很有前景的碳酸氢盐微藻培养技术路线。这种 PBR 将微藻培养基包裹在透明膜材料制成的袋子中，漂浮在近海海面上。根据培养的目的，PBR 可以用半透膜、反渗透膜或普通 PVC 膜制成，并且成本可以非常低（大约 $\$7.00 \text{ m}^{-2}$ ^[57]）。这种 PBR 自然具有较低的土地成本、水成本和光成本。以碳酸氢钠作为碳源，漂浮 PBR 可获得比开放式跑道池更高的生物量产量^[57]。在碳酸氢盐碳供应的基础上，开发了一种无需混合或曝气装置的简单浮式 PBR，在培养杜氏盐藻时达到了 $3.10 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 的峰值生物量生产率^[58]。在其设计理念中，波浪可以提供机械能来搅动藻类细胞悬浮液，从而节省了陆地 PBR 的电力成本。此外，PBR 中因藻类细胞生命活动而释放的热量可以及时转移到海水中，从而节省了陆上 PBR 专用冷却的成本。这种 PBR 的特性不适合曝气策略，而碳酸氢盐解决了其碳源供应问题。

适合该路线采用的微藻品种需要满足以碳酸氢盐作为碳源的基本要求，即耐碱度和耐盐度。此外，由于该系统使用密封的 PBR，耐高温应变可以降低冷却成本，如前所述。然而，密封 PBR 下的微藻产品优选是高附加值产品，对成本敏感度较低。因此，目标产物的产量仍然是该路线下藻类菌株需要满足的最优选条件。漂浮系统的培养条件不太可控，最终会体现在较低的生物量产量上，因此该系统可用于生产成本敏感、低成本的散装产品，如饲料和肥料。

由于该技术路线的土地成本对于陆基光生物反应器或海上浮式光生物反应器来说都不是很高，因此选址并不是商业化的首要考虑因素，更重要的是原料的可用性和产品的后续加工。例如，对于高价值产品驱动的 PBR 系统，平衡碳源和微藻产品运输成本的最佳位置是最合适的，而海水养殖厂附近的近海水域是浮动 PBR 系统的合理选择，其中饲料是主要的产品^[56]。

在这种技术路线下，密封的 PBR 限制碳源只在培养基和藻细胞之间流动，消耗的碳酸氢盐将全部转化为微藻生物质。根据 Zhu 等的研究^[56]，以 $8.4 \text{ g L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$ 作为碳源，浮动式 PBR 中钝顶螺旋藻的碳利用率可达 $104 \pm 2.6\%$ 。此外，微藻会将每两个碳酸氢盐转化为一个碳酸盐，而且由于 PBR 是密封的，碳酸氢盐不能随着大气中 CO_2 的加入而转化回碳酸氢盐。不过，正如许多研究人员所建议的那样，收获藻类细胞后剩余的培养基可以利用外源 CO_2 再生，在这种循环模式下，理论上微藻可以在这一途径中实现碳源的完全利用。

4. 观点

由于藻类物种和微藻产品的多样性，理论上这四种工艺路线都有足够数量的候选产品，以实现经济可行性。表 1 列出了这四种工艺路线的特点。

表 1. 四种联合工艺路线的一些特点。
Table 1. Some features of four technology routes of combined process.

	In-situ open route	Off-situ open route	In-situ sealed route	Off-situ sealed route	Ref.	
The utilization of flue gas	CO_2 bubbles	Bicarbonate	CO_2 bubbles	Bicarbonate		
CO_2 fixation rate	Microalgae strains	<i>Nannochloropsis oculata</i>	<i>Arthrospira</i> cells	sp. <i>Chlorella vulgaris</i>	[54,59,60]	
	Cultivation condition	1191 m^2 raceway ponds	900 L tangential spiral-flow column PBRs	Vertical bubble column glass reactors with a working volume of 500 mL		
	Data	$40.7 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$	/	$0.665 \text{ g L}^{-1} \text{ d}^{-1}$	$0.408 \text{ g L}^{-1} \text{ d}^{-1}$	
Carbon utilization efficiency	Microalgae strains	<i>Scenedesmus acutus</i>	<i>S. platensis</i>	<i>S. platensis</i>	<i>Dunaliella salina</i>	[12,61–63]
	Cultivation condition	Raceway ponds with an area of 5.6 m^2 and a volume of 900 L, use membrane carbonation to deliver CO_2	800 m^2 raceway pond supplied with NH_4HCO_3 and NaHCO_3	A 4 L helical PBR	250 mL baffled culture flasks containing 220 mL of either Modified Johnsons medium with 5 g L^{-1} of NaHCO_3	
	Data	$78\% \pm 55\%$	$70.50\% \pm 4.76\%$	50%–69%	91.40%	
Biomass productivity	Microalgae strains	<i>Staurorsira</i> sp.	<i>Chlorella sorokiniana</i> str. SLA-04	<i>Arthrospira</i> cells	sp. <i>Trebouxioiphyte</i>	[25,54,57,64]
	Cultivation condition	Raceway ponds with an area of 400 m^2 and a depth of 15 cm	Raceway ponds with an area of 4.2 m^2 and a depth of 17.8 cm	900 L tangential spiral-flow column PBRs	A bubble column PBR with a 5 cm diameter and a total 600 mL of working volume supplied with 300 mmol L^{-1} bicarbonate	
	Data	$21.1 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$	$18.0 \pm 1.8 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$	$0.29 \text{ g L}^{-1} \text{ d}^{-1}$	$0.80 \text{ g L}^{-1} \text{ d}^{-1}$	
Biomass production cost	$5.0\text{--}11.0 \text{ € kg}^{-1}$	$\$3.27 \text{ kg}^{-1}$	$3.1\text{--}6.0 \text{ € kg}^{-1}$	Extra $\$5.0\text{--}70 \text{ kg}^{-1}$ cost than raceway ponds	[5,13]	
Products	Biodiesel, biofertilizer, animal feed...	Biofertilizer, animal feed, human food...	Human medicine, cosmetics...	Human food, medicine, cosmetics...	/	
Product market	Large	Middle/large	Small	Small	/	

最后，对于上述组合过程的两个主要目的之一，从经济角度来看，到目前为止，除了少数以特定高价值产品为目标产品的培养物已经商业化外，还需要足够的实验和现场数据以便其他工艺路线得以推进。而且，如果要实现可观的利润，大规模工业化培养生产生物柴油、生物肥料或动物饲料等低价值、低利润的大宗商品是一条出路。从这一点来看，运营成本更低、更容易规模化的开放路线恐怕是需要重点关注的。

就固碳而言,最有前途的工艺路线是原位密封路线,但这也意味着固碳成本较高。而且,为了实现显著的固碳,大规模培养是不可避免的,而且这条路线也需要高昂的建设成本。为了解决这一矛盾,生产具有足够高价值以实现经济盈利的微藻产品、碳交易市场的碳税以及地方政府对绿色产业的补贴也可以纳入经济视角。

5. 结论

在微藻生物炼制中使用烟气作为碳源的组合工艺能够实现 CO₂ 固定和经济效益。提出了四种微藻固定 CO₂ 和生物质生物炼制技术路线,分别是原位开放系统、非原位开放系统、原位密封系统和非原位密封系统。它们适用于不同的 CO₂ 源、微藻种类和目标生物质产品。选择合适的技术路线扩大微藻固定 CO₂ 和生物质生物炼制的规模,可以获得良好的固碳环境效益和产品经济效益。在烟气中 CO₂ 浓度较低,目标产品为燃料、饲料、肥料等低利润商品的情况下,建议采用原位开放式路线;在烟气中 CO₂ 浓度较高,目标产品为食品、保健品、化妆品等高附加值产品的情况下,建议采用离位密封式路线。

致谢

本文得到了国家自然科学基金(52206270)的资助。

利益冲突

作者声明没有任何利益冲突。

参考文献

1. Lu G, Wang Z, Bhatti UH, et al. Recent progress in carbon dioxide capture technologies: A review. *Clean Energy Science and Technology* 2023; 1(1). doi: 10.18686/cest.v1i1.32
2. Zhang S, Liu Z. Advances in the biological fixation of carbon dioxide by microalgae. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology* 2021; 96(6): 1475–1495. doi: 10.1002/jctb.6714
3. Magalhães IB, Ferreira J, de SiqueiraCastro J, et al. Agro-industrial wastewater-grown microalgae: A techno-environmental assessment of open and closed systems. *Science of The Total Environment* 2022; 834: 155282. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.155282
4. Clarens AF, Resurreccion EP, White MA, et al. Environmental life cycle comparison of algae to other bioenergy feedstocks. *Environmental Science & Technology* 2010; 44(5): 1813–1819. doi: 10.1021/es902838n
5. Ruiz J, Olivieri G, de Vree J, et al. Towards industrial products from microalgae. *Energy & Environmental Science* 2016; 9(10): 3036–3043. doi: 10.1039/c6ee01493c
6. De Assis TC, Calijuri ML, Assemany PP, et al. Using atmospheric emissions as CO₂ source in the cultivation of microalgae: Productivity and economic viability. *Journal of Cleaner Production* 2019; 215: 1160–1169. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.01.093
7. Zhu Y, Cheng J, Zhang Z, et al. Mutation of *Arthrospira platensis* by gamma irradiation to promote phenol tolerance and CO₂ fixation for coal-chemical flue gas reduction. *Journal of CO₂ Utilization* 2020; 38: 252–261. doi: 10.1016/j.jcou.2020.02.003
8. Zhao Q, Jin G, Liu Q, et al. Tolerance comparison among selected spirulina strains cultured under high carbon dioxide and coal power plant flue gas supplements. *Journal of Ocean University of China* 2021; 20(6): 1567–1577. doi: 10.1007/s11802-021-4783-3
9. Mondal M, Ghosh A, Gayen K, et al. Carbon dioxide bio-fixation by *Chlorella* sp. BTA 9031 towards biomass and lipid production: Optimization using central composite design approach. *Journal of CO₂ Utilization* 2017; 22: 317–329. doi: 10.1016/j.jcou.2017.10.008
10. Sung YJ, Lee JS, Yoon HK, et al. Outdoor cultivation of microalgae in a coal-fired power plant for conversion of flue gas CO₂ into microalgal direct combustion fuels. *Systems Microbiology and Biomanufacturing* 2020; 1(1): 90–99. doi: 10.1007/s43393-020-00007-7
11. Sarat Chandra T, Deepak RS, Maneesh Kumar M, et al. Evaluation of indigenous fresh water microalga *Scenedesmus obtusus* for feed and fuel applications: Effect of carbon dioxide, light and nutrient sources on growth and biochemical characteristics. *Bioresource Technology* 2016; 207: 430–439. doi: 10.1016/j.biortech.2016.01.044

12. Kim GY, Heo J, Kim HS, et al. Bicarbonate-based cultivation of *Dunaliella salina* for enhancing carbon utilization efficiency. *Bioresource Technology* 2017; 237: 72–77. doi: 10.1016/j.biortech.2017.04.009
13. Zhu C, Chen S, Ji Y, et al. Progress toward a bicarbonate-based microalgae production system. *Trends in Biotechnology* 2022; 40(2): 180–193. doi: 10.1016/j.tibtech.2021.06.005
14. Zhu C, Zhang R, Cheng L, et al. A recycling culture of *Neochloris oleoabundans* in a bicarbonate-based integrated carbon capture and algae production system with harvesting by auto-flocculation. *Biotechnology for Biofuels* 2018; 11(1). doi: 10.1186/s13068-018-1197-6
15. Acien Fernández FG, Fernández Sevilla JM, Molina Grima E. Costs analysis of microalgae production. In: Pandey A, Chang JS, Soccol CR, et al (editors). *Biofuels from Algae*, 2nd ed. Elsevier; 2019. pp. 551–566. doi: 10.1016/b978-0-444-64192-2.00021-4
16. Shekh A, Sharma A, Schenk PM, et al. Microalgae cultivation: Photobioreactors, CO₂ utilization, and value-added products of industrial importance. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology* 2021; 97(5): 1064–1085. doi: 10.1002/jctb.6902
17. Fernández FGA, Reis A, Wijffels RH, et al. The role of microalgae in the bioeconomy. *New Biotechnology* 2021; 61: 99–107. doi: 10.1016/j.nbt.2020.11.011
18. Morales-Amaral MDM, Gómez-Serrano C, Acien FG, et al. Outdoor production of *Scenedesmus* sp. in thin-layer and raceway reactors using centrate from anaerobic digestion as the sole nutrient source. *Algal Research* 2015; 12: 99–108. doi: 10.1016/j.algal.2015.08.020
19. Venancio HC, Cella H, Lopes RG, et al. Surface-to-volume ratio influence on the growth of *Scenedesmus obliquus* in a thin-layer cascade system. *Journal of Applied Phycology* 2020; 32(2): 821–829. doi: 10.1007/s10811-020-02036-0
20. Villaró S, Sánchez-Zurano A, Ciardi M, et al. Production of microalgae using pilot-scale thin-layer cascade photobioreactors: Effect of water type on biomass composition. *Biomass and Bioenergy* 2022; 163: 106534. doi: 10.1016/j.biombioe.2022.106534
21. Zhu B, Shen H, Li Y, et al. Large-scale cultivation of *spirulina* for biological CO₂ mitigation in open raceway ponds using purified CO₂ from a coal chemical flue gas. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* 2020; 7. doi: 10.3389/fbioe.2019.00441
22. Day JG, Gong Y, Hu Q. Microzooplanktonic grazers—A potentially devastating threat to the commercial success of microalgal mass culture. *Algal Research* 2017; 27: 356–365. doi: 10.1016/j.algal.2017.08.024
23. Rasheed R, Thaher M, Younes N, et al. Solar cultivation of microalgae in a desert environment for the development of techno-functional feed ingredients for aquaculture in Qatar. *Science of The Total Environment* 2022; 835: 155538. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.155538
24. Mohan N, Rao PH, Boopathy AB, et al. A sustainable process train for a marine microalga-mediated biomass production and CO₂ capture: A pilot-scale cultivation of *Nannochloropsis salina* in open raceway ponds and harvesting through electroprecipitation. *Renewable Energy* 2021; 173: 263–272. doi: 10.1016/j.renene.2021.03.147
25. Vadlamani A, Pendyala B, Viamajala S, et al. High productivity cultivation of microalgae without concentrated CO₂ input. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 2018; 7(2): 1933–1943. doi: 10.1021/acssuschemeng.8b04094
26. Giostri A, Binotti M, Macchi E. Microalgae cofiring in coal power plants: Innovative system layout and energy analysis. *Renewable Energy* 2016; 95: 449–464. doi: 10.1016/j.renene.2016.04.033
27. Magalhães IB, Ferreira J, de Siqueira Castro J, et al. Technologies for improving microalgae biomass production coupled to effluent treatment: A life cycle approach. *Algal Research* 2021; 57: 102346. doi: 10.1016/j.algal.2021.102346
28. Acedo M, Gonzalez Cena JR, Kiehlbaugh KM, et al. Coupling carbon capture from a power plant with semi-automated open raceway ponds for microalgae cultivation. *Journal of Visualized Experiments* 2020; 162. doi: 10.3791/61498-v
29. Zhang RL, Wang JH, Cheng LY, et al. Selection of microalgae strains for bicarbonate-based integrated carbon capture and algal production system to produce lipid. *International Journal of Green Energy* 2019; 16(11): 825–833. doi: 10.1080/15435075.2019.1641103
30. Sampathkumar SJ, Gothandam KM. Sodium bicarbonate augmentation enhances lutein biosynthesis in green microalgae *Chlorella pyrenoidosa*. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology* 2019; 22: 101406. doi: 10.1016/j.bcab.2019.101406
31. Xia B, Chen B, Sun X, et al. Interaction of TiO₂ nanoparticles with the marine microalga *Nitzschia closterium*: Growth inhibition, oxidative stress and internalization. *Science of The Total Environment* 2015; 508: 525–533. doi: 10.1016/j.scitotenv.2014.11.066
32. Zhu C, Zhai X, Jia J, et al. Seawater desalination concentrate for cultivation of *Dunaliella salina* with floating photobioreactor to produce β-carotene. *Algal Research* 2018; 35: 319–324. doi: 10.1016/j.algal.2018.08.035
33. Costa JAV, Freitas BCB, Rosa GM, et al. Operational and economic aspects of *Spirulina*-based biorefinery.

- Bioresource Technology* 2019; 292: 121946. doi: 10.1016/j.biortech.2019.121946
34. Borovkov AB, Gudvilovich IN, Avsiyan AL, et al. Light supply and mineral nutrition conditions as optimization factors for outdoor mass culture of carotenogenic microalga *Dunaliella salina*. *Aquaculture Research* 2021; 52(12): 6098–6106. doi: 10.1111/are.15471
 35. Bartley ML, Boeing WJ, Dungan BN, et al. pH effects on growth and lipid accumulation of the biofuel microalgae *Nannochloropsis salina* and invading organisms. *Journal of Applied Phycology* 2013; 26(3): 1431–1437. doi: 10.1007/s10811-013-0177-2
 36. Xu H, Lee U, Coleman AM, et al. Balancing water sustainability and productivity objectives in microalgae cultivation: Siting open ponds by considering seasonal water-stress impact using AWARE-US. *Environmental Science & Technology* 2020; 54(4): 2091–2102. doi: 10.1021/acs.est.9b05347
 37. Venteris ER, Skaggs RL, Coleman AM, et al. A GIS cost model to assess the availability of freshwater, seawater, and saline groundwater for algal biofuel production in the United States. *Environmental Science & Technology* 2013; 47(9): 4840–4849. doi: 10.1021/es304135b
 38. Yang J, Xu M, Zhang X, et al. Life-cycle analysis on biodiesel production from microalgae: Water footprint and nutrients balance. *Bioresource Technology* 2011; 102(1): 159–165. doi: 10.1016/j.biortech.2010.07.017
 39. Villaró S, Morillas-España A, Ación G, et al. Optimisation of operational conditions during the production of *arthrospira platensis* using pilot-scale raceway reactors, protein extraction, and assessment of their techno-functional properties. *Foods* 2022; 11(15): 2341. doi: 10.3390/foods11152341
 40. Polle JEW, Jin E, Ben-Amotz A. The alga *Dunaliella* revisited: Looking back and moving forward with model and production organisms. *Algal Research* 2020; 49: 101948. doi: 10.1016/j.algal.2020.101948
 41. Fabris M, Abbriano RM, Pernice M, et al. Emerging technologies in algal biotechnology: Toward the establishment of a sustainable, algae-based bioeconomy. *Frontiers in Plant Science* 2020; 11. doi: 10.3389/fpls.2020.00279
 42. Guo W, Cheng J, Ali KA, et al. Conversion of NaHCO_3 to Na_2CO_3 with a growth of *Arthrospira platensis* cells in 660 m² raceway ponds with a CO₂ bicarbonation absorber. *Microbial Biotechnology* 2019; 13(2): 470–478. doi: 10.1111/1751-7915.13497
 43. Eustance E, Badvipour S, Wray JT, et al. Biomass productivity of two *Scenedesmus* strains cultivated semi-continuously in outdoor raceway ponds and flat-panel photobioreactors. *Journal of Applied Phycology* 2015; 28(3): 1471–1483. doi: 10.1007/s10811-015-0710-6
 44. Rajkumar R, Takriff MS, Veeramuthu A. Technical insights into carbon dioxide sequestration by microalgae: A biorefinery approach towards sustainable environment. *Biomass Conversion and Biorefinery* 2022. doi: 10.1007/s13399-022-02446-9
 45. Chauton MS, Reitan KI, Norsker NH, et al. A techno-economic analysis of industrial production of marine microalgae as a source of EPA and DHA-rich raw material for aquafeed: Research challenges and possibilities. *Aquaculture* 2015; 436: 95–103. doi: 10.1016/j.aquaculture.2014.10.038
 46. Vázquez-Romero B, Perales JA, Pereira H, et al. Techno-economic assessment of microalgae production, harvesting and drying for food, feed, cosmetics, and agriculture. *Science of The Total Environment* 2022; 837: 155742. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.155742
 47. Schipper K, Al-Jabri HMSJ, Wijffels RH, et al. Techno-economics of algae production in the Arabian Peninsula. *Bioresource Technology* 2021; 331: 125043. doi: 10.1016/j.biortech.2021.125043
 48. Norsker NH, Barbosa MJ, Vermuë MH, et al. Microalgal production—A close look at the economics. *Biotechnology Advances* 2011; 29(1): 24–27. doi: 10.1016/j.biotechadv.2010.08.005
 49. Suzuki H, Hulatt CJ, Wijffels RH, et al. Correction to: Growth and LC-PUFA production of the cold-adapted microalga *Koliella antarctica* in photobioreactors. *Journal of Applied Phycology* 2018; 31(2): 999. doi: 10.1007/s10811-018-1646-4
 50. Choi YY, Joun JM, Lee J, et al. Development of large-scale and economic pH control system for outdoor cultivation of microalgae *Haematococcus pluvialis* using industrial flue gas. *Bioresource Technology* 2017; 244: 1235–1244. doi: 10.1016/j.biortech.2017.05.147
 51. Tredici MR, Rodolfi L, Biondi N, et al. Techno-economic analysis of microalgal biomass production in a 1-ha Green Wall Panel (GWP®) plant. *Algal Research* 2016; 19: 253–263. doi: 10.1016/j.algal.2016.09.005
 52. Oostlander PC, van Houcke J, Wijffels RH, et al. Microalgae production cost in aquaculture hatcheries. *Aquaculture* 2020; 525: 735310. doi: 10.1016/j.aquaculture.2020.735310
 53. López AR, Rodríguez SB, Vallejo RA, et al. Sustainable cultivation of *Nannochloropsis gaditana* microalgae in outdoor raceways using flue gases for a complete 2-year cycle: A circular economy challenge. *Journal of Applied Phycology* 2019; 31(3): 1515–1523. doi: 10.1007/s10811-018-1710-0
 54. Ye Q, Cheng J, Liu S, et al. Improving light distribution and light/dark cycle of 900 L tangential spiral-flow column photobioreactors to promote CO₂ fixation with *Arthrospira* sp. cells. *Science of The Total Environment* 2020; 720: 137611. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137611
 55. Choi SY, Sim SJ, Ko SC, et al. Scalable cultivation of engineered cyanobacteria for squalene production from industrial flue gas in a closed photobioreactor. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 2020; 68(37): 10050–

10055. doi: 10.1021/acs.jafc.0c03133
56. Zhu C, Zhai X, Xi Y, et al. Progress on the development of floating photobioreactor for microalgae cultivation and its application potential. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 2019; 35(12). doi: 10.1007/s11274-019-2767-x
 57. Zhu C, Xi Y, Zhai X, et al. Pilot outdoor cultivation of an extreme alkalihalophilic *Trebouxiophyte* in a floating photobioreactor using bicarbonate as carbon source. *Journal of Cleaner Production* 2021; 283: 124648. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124648
 58. Huang JJ, Bunjamin G, Teo ES, et al. An enclosed rotating floating photobioreactor (RFP) powered by flowing water for mass cultivation of photosynthetic microalgae. *Biotechnology for Biofuels* 2016; 9(1). doi: 10.1186/s13068-016-0633-8
 59. Cheng J, Yang Z, Huang Y, et al. Improving growth rate of microalgae in a 1191 m² raceway pond to fix CO₂ from flue gas in a coal-fired power plant. *Bioresource Technology* 2015; 190: 235–241. doi: 10.1016/j.biortech.2015.04.085
 60. Mitra R, Das Gupta A, Kumar RR, et al. A cleaner and smarter way to achieve high microalgal biomass density coupled with facilitated self-flocculation by utilizing bicarbonate as a source of dissolved carbon dioxide. *Journal of Cleaner Production* 2023; 391: 136217. doi: 10.1016/j.jclepro.2023.136217
 61. Eustance E, Lai YJS, Shesh T, et al. Improved CO₂ utilization efficiency using membrane carbonation in outdoor raceways. *Algal Research* 2020; 51: 102070. doi: 10.1016/j.algal.2020.102070
 62. Ding Y, Li X, Wang Z, et al. Ammonium bicarbonate supplementation as carbon source in alkaliphilic *Spirulina* mass culture. *Aquaculture Research* 2017; 48(9): 4886–4896. doi: 10.1111/are.13308
 63. Soletto D, Binaghi L, Ferrari L, et al. Effects of carbon dioxide feeding rate and light intensity on the fed-batch pulse-feeding cultivation of *Spirulina platensis* in helical photobioreactor. *Biochemical Engineering Journal* 2008; 39(2): 369–375. doi: 10.1016/j.bej.2007.10.007
 64. Huntley ME, Johnson ZI, Brown SL, et al. Demonstrated large-scale production of marine microalgae for fuels and feed. *Algal Research* 2015; 10: 249–265. doi: 10.1016/j.algal.2015.04.016

Review Article**Flue gas CO₂ supply methods for microalgae utilization: A review**

Xiaosu Yu¹, Wangbiao Guo^{2,3,*}, Zhan Hu⁴, Pengcheng Li⁴, Zhuowei (Amanda) Zhang⁵, Jun Cheng³, Chunfeng Song^{4,*}, Qing Ye^{1,*}

¹ College of Energy, Soochow University, Suzhou 215006, Jiangsu Province, China

² Microbial Sciences Institute, Yale University, West Haven, CT 06516, USA

³ State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China

⁴ School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

⁵ College of Arts and Sciences, University of Washington, Seattle, WA 98105, United States

* **Corresponding author:** Wangbiao Guo, wangbiao.guo@yale.edu; Chunfeng Song, chunfeng.song@tju.edu.cn; Qing Ye, yeqing@suda.edu.cn

Abstract: The potential for utilizing flue gas as a carbon source in microalgal cultivation holds great promise. Incorporating flue gas as a carbon source into microalgae culture processes can accelerate the growth rate of microalgae, consequently enhancing the overall economic viability of the integrated process. There are two key sources of flue gas to consider: flue gas from coal-fired power plants, characterized by a CO₂ concentration of 12–15 w/w%, and flue gas from coal chemical processes, boasting a CO₂ concentration of 90–99 w/w%. Additionally, the choice between an open or sealed microalgae culture system can also influence economic efficiency. Thus, there are four distinct microalgal cultivation routes to assess: in-situ open systems, off-situ open systems, in-situ sealed systems, and off-situ sealed systems. The incorporation of flue gas as a carbon source in microalgae cultivation demonstrates significant potential for reducing both environmental impact and costs, rendering it a highly promising and sustainable approach for economically efficient microalgae cultivation. In this review, the in-situ open route is recommended for the situation with high flue gas CO₂ concentration and the target products of low-margin commodities, while the off-situ sealed route is suitable for the situation with low flue gas CO₂ concentration and the target products of high value-added products.

Keywords: flue gas; microalgae; biorefinery; photobioreactor; technological process
