



Research
Green Chemical Engineering—Review

大规模培养光合生物的光生物反应器设计

黄青山^{a,b}, 蒋夫花^a, 王连洲^c, 杨超^{a,b,*}

^a Qingdao Institute of Bioenergy and Bioprocess Technology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266101, China

^b Key Laboratory of Green Process and Engineering, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

^c Nanomaterials Center, School of Chemical Engineering and Australian Institute for Bioengineering and Nanotechnology, The University of Queensland, Queensland 4072, Australia

ARTICLE INFO

Article history:

Received 22 December 2016

Revised 17 April 2017

Accepted 9 March 2017

Available online 23 May 2017

关键词

光生物反应器

太阳能

光合成

流体动力学

闪光效应

摘要

光合微生物是生产环境友好的目标产品的重要生物资源, 光生物反应器是实现这些过程的重要工具。目前, 用于光催化的光生物反应器的设计具有挑战性, 大多数光反应器仍然采用半经验的方法进行设计和放大。即使对于高效的光生物反应器, 由于缺乏对光的传播、流体动力学、传质、细胞生长之间耦合作用的深刻了解, 依靠半经验方法设计的反应器具有投资和运行成本高、使用寿命短的缺点, 因此迄今为止尚没有一款合适的光生物反应器可用于光合微生物的大规模培养。首先, 本文概述了影响光生物反应器性能的关键参数包括光、混合、传质、温度、pH 值、投资和运行成本等, 强调了在商业化培养中光生物反应器的寿命、清洁成本和温度控制的重要性。然后, 推荐了四种(即管式光生物反应器、塑料袋式光生物反应器、柱状气升环流式光生物反应器和平板气升环流式光反应器)可进行光合微生物大规模培养的光生物反应器。最后, 阐述了采用计算流体力学这一有力工具进行光生物反应器建模从而实现光生物反应器的理性设计, 并分析了当今数学建模的难点, 展示了基于机理模型设计光生物反应器的发展前景。

© 2017 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of the Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

光合微生物如单细胞微藻、蓝藻和植物细胞等是一些具有广泛应用前景的高潜力生物资源, 可用于食品和动物饲料[1,2]、营养保健品[3,4]、药物[5,6]、颜料和化妆品[5,7]、废水处理[8,9]、精细化学品[2,10]、生物燃料[11,12]以及CO₂生物封存[10,13]等。

光生物反应器工艺旨在利用太阳能, 将CO₂和水转化为所需产品。与同使用光合微生物进行目标产物生产的开放式系统[14]相比, 由于封闭式光生物反应器具有

较高的光合效率、较高的产物浓度和单位面积产量、污染少、可防止蒸发而造成水分流失以及易于精确控制的生长环境等突出优点[13,15], 因此采用封闭式光生物反应器进行微生物培养是一种非常有吸引力的方法。典型的光生物反应器是一个三相系统, 其中包括作为液相的培养基、作为固相的细胞和作为气相在自养培养过程中提供营养的富含CO₂的空气。作为光反应器的专有特征, 光生物反应器中的光是一个叠加的辐射场, 通常也被称为第四相[16]。由于流体的吸收和散射, 光强沿传递方向急剧下降, 因此光生物反应器中的辐射场是高度不均

* Corresponding author.

E-mail address: chaoyang@ipe.ac.cn

匀的。众所周知,光利用率是光生物反应器中细胞生长的限制性因素[17,18]。

迄今为止,已经开发出了各种类型的封闭式光生物反应器,其中包括鼓泡塔[19-22]、气升式环流反应器[23-27]、平板式反应器[28]、搅拌釜[29,30]、管式反应器[31,32]、圆锥形反应器[33,34]、环面光生物反应器[35]和海草型光生物反应器[36]等,然而只有极少数类型的光生物反应器可用于光合微生物的大规模培养。实际上,光生物反应器主要采用半经验方法进行设计[37-39],本文在此以培养微藻的光生物反应器为例进行说明。由于光生物反应器技术发展欠佳,迄今仅有屈指可数的几种微藻能够实现商业化的培养[20]。因此亟需大量更深入的研究,尤其是理论与实践相结合的研究,以充分释放商业化培养的全部潜力[40]。

虽然已经开发出如上所述各种各样的新型光生物反应器,但在商业开发时应全面考虑投资成本、运行成本和寿命等因素。正如我们的前期工作[41]指出,由于光生物反应器的复杂性,设计出高效的光生物反应器仍然是一个重大的挑战。必须仔细考虑的重要因素如光分布、流体动力学、传质和生长动力学等都是密切相关的,这使得光生物反应器的设计更加复杂。因此,迫切需要在光分布、流体混合、相间传质和细胞生长环境等方面深入了解细胞生长与光生物反应器理论参数的关系。

本文首先分析了主要设计因素对工业光生物反应器性能的影响,并总结了可进行大规模微藻培养且最有应用前景的光生物反应器。其次,本文还阐述了适宜于光生物反应器设计的理论模型,其中包括光、混合、传质和细胞生长之间的相互作用,可用于指导高效光生物反应器的理性设计。最后,展望了可用于规模化培养光合微生物的工业光生物反应器的设计前景。

2. 光生物反应器设计的主要因素

在高效光生物反应器的设计中,反应器内光的传播和分布是主要影响因素。此外,良好的混合和质量传递以及有利的温度和pH值可以显著改善微藻的生长。最后,投资和运行成本是性价比高的光生物反应器可长周期运行的关键因素。下面详细阐述了这些方面的进展。

2.1. 光

为大幅降低成本,通常采用太阳光进行微藻的大规模培养。然而,入射的阳光因天气、昼夜循环和季节变

化而不可避免地会发生变化。比如,在中国,阳光灿烂的夏日,太阳光的光子通量密度超过 $2000 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,然而,进行光合作用的生物体将太阳能转换为生物质能的理论最大转换效率只有8%~10%[16,32,42]。此外,光的光谱质量是微藻培养的重要因素。虽然阳光覆盖了广泛的光谱范围,但只有大约相当于可见光光谱即波长在400~700 nm范围内的太阳光辐射才是光合有效辐射(photosynthetically active radiation, PAR)。PAR约占阳光的50%,PAR以外的光辐射是培养过程中温度上升的主要原因。此外,在某些频率(如紫外线)下的非PAR对生物细胞是致命的[13]。

由于培养基对光的吸收和散射,光强在光生物反应器内的分布是非常不均匀的[43]。光辐射的衰减取决于光的波长、细胞浓度、光生物反应器的几何形状以及光的穿透距离。众所周知,随着距光生物反应器光源距离的增加,光强沿传播方向几乎呈指数下降。在某些情况下,当光生物反应器中的微藻密度达到 $10 \text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,光仅能穿透几毫米[17]。因此,随着光生物反应器深度的增加,微藻细胞的生长速率显著下降。如果光的强度高于临界值并达到饱和水平,则细胞生长将被光抑制(简称光抑制),也就是光将被浪费,首先是转化为荧光,然后再转化为热。另外,如果光强度低于平衡生长所需的水平,则微藻的生长将受到光的限制(简称光限制),其生长将崩溃。

根据细胞的生长速率,可将光生物反应器依次分为三个不同的区域:第一个区域为强光照区,其具有抑制作用,范围从光照壁面一直延伸至某点且该点可接收的光能刚好等于细胞以最大速率生长所需的光能;接下来为弱光照区,在光的摄入量刚好满足维持所需能量的地方结束;最后为光暗区,由于光的利用率有限,细胞的生长速率为负值[44,45]。如果考虑光抑制,则分区将变得更加复杂。这是因为光抑制可能导致光源附近的生长速率下降[45]。因此,在强光照区光抑制不太强时,光合活性高于呼吸,从而导致细胞净生长,且光合速率会随辐照强度的增加而降低。然而,如果光的强度高于某一临界值,则会在该区域产生负的细胞生长速率。因此,应尽可能避免光抑制的情况。光抑制可能是可逆的或者不可逆的,这取决于光强大小和微藻在强光胁迫下的暴露时间[13]。在弱光照区,光合活性高于呼吸,观察到正的细胞生长速率,并且细胞生长速率随光吸收量的增加而增大。

普通小球藻的光维持强度(即低于此光照强度值时

会发生光限制)为 $5\sim 10\ \mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 光饱和强度(高于此光照强度值时会发生光抑制现象)约为 $250\ \mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ [20]。值得注意的是, 正常日照情况下的阳光强度远远高于光合作用所需的光饱和强度, 导致吸收的过量能量被耗散和损失[42]。然而, 一些研究人员通过实验发现, 由光生物反应器背面的反射镜提供的弱连续背景光显著有利于微藻的生长[10,46]。此外, 据报道, 光生物反应器东西方向排列的生物物质产量是南北方向排列的1.4倍, 这是因为在北半球前者比后者得到更多的太阳辐射[47-49]。

为了实现细胞的高密度培养, 光生物反应器的厚度应尽可能小[16]。因此薄光学厚度的设计被广泛应用于商业光生物反应器中[50]。例如, Degen等[20]发现, 光路径从30 mm减少到15 mm时, 平板气升环流式光生物反应器的生物物质产量提高了2.5倍。

2.2. 混合

混合是微藻培养的一个关键特征[51], 不仅可以降低培养基中营养成分、pH值和温度的梯度, 还可以防止细胞沉淀、死区的出现、细胞团聚以及细胞附着在光生物反应器的器壁上[52]。此外, 混合可保证所有细胞均等地暴露于阳光下并促进相间的传质。然而, 如果微藻对剪切力敏感, 则过度的混合可能会导致细胞损伤并导致培养系统不能继续维持而崩溃[53]。Posten[16]认为, 液体速度大于 $1\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 会产生直径小于 $50\ \mu\text{m}$ 的微涡, 这可能会对细胞有损伤, 推荐液速为 $20\sim 50\ \text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

混合时间 t_m 是混合的全局指标, 其定义为注入的示踪剂在获得接近完全混合状态所规定的均匀性时所需的时间。实际上, 混合时间被定义为系统在注入示踪剂后达到允许有 $\pm 5\%$ 偏差的均匀状态所需的时间[41,54]。混合时间不仅受到轴向和径向混合的影响, 还受到总体流动的影响。

光生物反应器中的混合通常通过富含 CO_2 的气体曝气或泵、叶轮或静态混合器的机械搅拌或这些方法的组合来实现[13]。一般认为, 混合导致微藻细胞在光区和暗区之间穿梭, 产生有利的、周期性的光/暗循环(L/D循环, 即闪光效应), 显著地改变了反应器中的光辐射场, 从而有利于促进光合转化[55,56]。光合转化是微藻细胞的一种动态过程, 一般认为有益的L/D循环可改变细胞的光合生长速率[2]。因此, 混合在光生物反应器中光强度的再分配方面起着重要作用。

周期性L/D循环可以由以下参数[57,58]进行定义: 闪光时间(t_l , 即光照持续的时间)、光暗时间(t_d , 即一个L/D循环周期中无光照的时间)、循环时间($t_c = t_l + t_d$, 即一个L/D循环的持续时间)、占空比($\varphi = t_l/t_c$, 即在L/D循环中光照时间的比例)和闪频($\nu = 1/t_c$, 即循环的频率)。

Abu-Ghosh等[59]观察到闪光效应可以增强光合作用、提高产品的质量和数量。Iluz和Abu-Ghosh[46]发现, 当L/D循环频率为60 Hz时, 微藻的产量可提高55%以上。Degen等[20]在鼓泡塔中间歇培养小球藻的研究中发现: 加强径向混合后, 微藻的产量是随机混合的1.7倍。然而, 在实验中也发现, 当采用未优化的L/D循环周期或闪光频率时, 微藻的产量会降低[40,58,60,61]。Kliphuis等[62]发现, 当混合速率增加了两倍时, 微藻产量仅有小幅增加。Zijffers等[63]也发现, 当通气量增加时, 细胞产量并没有明显的增加。

L/D循环频率对细胞生长的影响存在着争议, 需要进一步研究进行澄清。例如, Huang等[64]认为当L/D循环频率大于25 Hz甚至100 Hz时, 闪光效应对增产起积极作用。在0.5的占空比下, 与无暗区相对比, Vejrazka等[61]发现若L/D循环频率低于10 Hz时会导致生物产量平均降低10%; 而在100 Hz的频率下, 可平均提高35%的生物产量。Posten[16]认为混合频率应不低于1 Hz。Zhu等[65]也发现当L/D循环频率高于1 Hz时, 细胞生长得到改善; 而Katsuda等[66]发现在1 Hz的低频率下, 雨生红球藻中的虾青素浓度可提高0.5倍。

占空比是有效利用L/D循环的一个重要因素。Wu和Merchuk[67]研究了紫球藻在三种不同的光照强度(即 $110\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $220\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $550\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)下的生长, 通过在光生物反应器表面部分覆盖铝箔的方法研究L/D循环的影响。研究结果表明, 当发生光抑制及黑暗持续时间只有数秒时, L/D循环周期对细胞的生长是有利的。Vejrazka等[58,60]和Grobbelaar[68]也认为, 在亚饱和或超饱和光强且较高L/D循环频率下, 若光照时间相同, 较长的黑暗持续时间可以促进光合效率, 但反之不成立。

为什么会出现这些现象? 我们认为细胞产率应该由入射光照强度、辐射光谱、培养基密度、闪光频率和占空比的相互作用决定, 应该对这些因素之间的耦合进行更加详细的研究。为了更合理地设计和优化光生物反应器, 对这些机理的深入了解是非常必要的。

2.3. 传质

众所周知，微藻的细胞生长涉及细胞生长的三个竞争过程：光合作用、光呼吸和暗呼吸[13]。微藻的光合作用是利用光能和CO₂，同时输出副产物O₂。然而，在高溶解氧浓度下，为卡尔文循环提供CO₂的主要羧化酶即核酮糖-1,5-二磷酸羧化酶加氧酶(简称Rubisco)也可消耗氧气、产生CO₂用于光呼吸[13]。

此外，作为光合作用副产物释放的许多溶解氧在培养基中积累，可达到高毒性水平，从而威胁微藻的生存[41,65]。高温、高光强再加上CO₂不足等不利条件，可以加强溶解氧的抑制作用[13]。据报道，在封闭式系统特别是管式光生物反应器中，由于仅在脱气器处通过质量传递除去累积的溶解氧，累积的溶解氧可能引起细胞生长的严重抑制。由于溶解氧不仅可以氧化一种或多种酶，而且会影响电子传递链和抑制光合作用过程，故在微生物培养过程中，培养基中的溶解氧含量应限定在一定范围内。Chisti[69]提出为防止这种抑制作用，溶解氧浓度不应超过空气饱和度的400%；而Ugwu等[70]发现当溶解氧浓度超过空气饱和值的200%(即448 μmol·L⁻¹)时，小球藻的细胞产量会显著降低。

CO₂通常被当作微藻自养培养的碳源。由于气相CO₂不能直接被利用，微藻细胞只能使用液相中的溶解CO₂。如果液相中溶解的CO₂浓度太低(例如，当空气作为进料气体或当管式光生物反应器的长度太长时)，或者在光生物反应器中混合不充分，则CO₂的供应可能会成为一个束缚因素。Posten[16]和Acién Fernández等[53]认为CO₂必须以足够高的浓度供应从而防止限制细胞生长的情况发生。因此，推荐CO₂偏分压应高于0.2 kPa(即0.076 mol·m⁻³，相当于3.3 mg·L⁻¹)。由于大气中的CO₂偏分压为0.04 kPa，因此用纯空气(即CO₂体积分数为0.035%)供给CO₂是不足的，需要用含有一定量CO₂的气体混合物。

另外，高浓度的溶解CO₂可导致培养基pH降低，这也会抑制一些微藻细胞的生长[13]。因此，将溶解CO₂浓度水平维持在合理的范围是非常重要的，最佳溶解CO₂浓度取决于物种的属性。研究发现，CO₂-空气体积比例为1%和4%分别是盐藻和栅藻的最佳浓度[71]。然而，Chiu等[72]研究发现，当CO₂曝气浓度高达10%~15%时，小球藻的生长会受到抑制。Zhu等[65]研究也发现当CO₂体积浓度为1%~5%时，一般可获得较大的光合效率。

对于微藻的培养，一般在光生物反应器中设计专用

的气体交换空间，以保持溶解CO₂和溶解氧的最佳平衡。众所周知，混合是增强光生物反应器中相间传质的有效方法。

2.4. 温度

光生物反应器的体积通常较小，这是为了利于光的传递而采用了较薄的光学厚度。因此在夏天阳光充足的时候，温度上升很明显。温度是光催化反应的主要影响因素[73]，并且对物质的化学平衡、气体溶解度和pH也有影响[4]。微藻培养的最佳温度一般在20~24℃之间[45]，大多数微藻可耐受16~35℃的水温[45,69,74]。当温度低于16℃时，细胞生长速率将降低；高于35℃的温度对一些生物细胞是致命的[45]。由于昼夜和季节更迭，在商业培养过程中温差变化相当大。已有研究表明，在没有温度控制系统的情况下，光生物反应器中的温度可能比夏季的环境温度高10~30℃[13]。因此，为了将培养温度保持在有利的范围内，在光生物反应器中必须有经济、可靠的温度控制系统。

在夏天，经常采用的温度控制方法包括以下几种：使用不透光的薄片进行遮光[75]、当培养基温度超过指定值时在光生物反应器的器壁表面喷水[76]、将光生物反应器部分或全部淹没在水池中[13,77]、管道重叠遮光[39]、调节进料温度[39]或为光生物反应器安装热交换器[78]等。需要指出的是，为防止微藻死于由于吸收太阳能过多而导致温升过高的温度控制系统是工业光生物反应器中的昂贵部件[79]。

遮蔽光生物反应器的效率较低，因为它大大降低了光的利用效率。喷水是一种高效冷却方法，但是需要泵送大量的水而增加操作费用。如上所述，另一种常用的降温方法即将光生物反应器浸入水中，且水池中的光反射已被证实可提高培养基中的平均光照强度[80]。

2.5. pH

大多数类型的微藻最适宜的pH范围是8.2~8.7，尽管它们也可以在7~9之间的pH范围内培养[81]。然而，一些物种甚至可以耐受更加酸性或碱性范围内的不利条件[13]。为防止由于培养基中有害的pH环境破坏细胞生长过程，将培养基的pH值保持在最佳值范围内是至关重要的。

进行微藻的高密度培养时，若采用高浓度CO₂的烟道气或者纯CO₂曝气，CO₂被微藻利用进行光合作用的同时也增加了培养基的pH值[65]。因此，溶解CO₂的浓

度可能是影响培养基pH值的一个重要因素。由于CO₂的溶解度取决于培养基的pH值，所以溶液中CO₂的浓度是微藻细胞消耗的CO₂与从气相通过质量传递到液相的CO₂达到平衡的结果。一般来说，CO₂在水中的溶解度较低，在纯水中25℃时为1650 ppm[82]。由于CO₂/HCO₃⁻/CO₃²⁻平衡的存在，CO₂的加入缓冲了培养基中pH变化的影响[83–85]，并且pH对CO₂溶解平衡中各组分的分配系数有显著影响。

Li[84]指出，在25℃条件下，当pH值低于4.5时，大多数无机碳是CO₂；pH约为6.5时，在淡水中CO₂达溶解平衡时形成的CO₂和碳酸氢盐(HCO₃⁻)的比例是相等的；当pH为8.3时，几乎所有的碳都是以碳酸氢盐(HCO₃⁻)形式存在。从此点开始至pH约为10.4时，组分中碳酸氢盐(HCO₃⁻)的比例不断降低并最终等于碳酸盐(CO₃²⁻)的比例；当pH高于12时，大部分无机碳呈碳酸盐形式(CO₃²⁻)。微藻可以迅速并充分利用光生物反应器中以碳酸氢根离子(HCO₃⁻)形式存在的无机碳，一些种类甚至能够利用碳酸根离子(CO₃²⁻) [82]。因此，在高pH值条件下，微藻生长过程中CO₂的利用率成为一个问题[45,86]。在这种情况下，应该在培养过程中严格控制培养液的pH值，以加强微藻的CO₂吸收和利用[65]。因此广泛使用碳酸氢钠等物质来控制培养基的pH值，避免其上升过快。

2.6. 投资与运行成本

从经济的角度来看，高效工业光生物反应器应具有以下特点：高光照比表面积以捕获太阳辐射、易于温度控制、良好的混合和质量传递、低细胞剪切应力以及低投资和运行成本。实际上，高比表面积、良好的混合和质量传递性能以及低剪切应力的要求在光生物反应器中易于满足，但温度控制及低投资和运行费用却难以保证。

在设计具有高比表面积的高效光生物反应器时，首要考虑因素是因光照表面积增加而显著增加的投资成本[16]。目前，玻璃、有机玻璃、聚氯乙烯(PVC)、丙烯酸PVC和聚乙烯是制造光生物反应器的主要材料[13]。这些材料都满足制造光生物反应器所需的透明度和机械稳定性要求。然而，每种材料都有自己的优缺点，适合制作特定类型的光生物反应器。例如，玻璃坚固、透明、使用寿命长，是制造小型光生物反应器的完美材料；然而，当用于制造大型光生物反应器时，需要许多昂贵的连接部件，并且通常易在曝气孔等位置发生泄漏。有机

玻璃、PVC、丙烯酸PVC和聚乙烯等材料由于在空气中不断氧化，其透明度不断降低。若利用微藻转化为生物能源的技术路线切实可行，建议光生物反应器的投资成本应低于40 €·m⁻²[16]。

第二个考虑因素是运行成本，其中包括用于混合和质量传递的辅助能源成本、温度和pH值控制成本、为防止泄漏而进行的维修和清洁成本等。混合、传质和温度控制系统是商业光生物反应器中昂贵的组件[79]。此外，混合、传质和温度控制操作成本占运行成本的比例最大。清洁可防止污染[13]和细胞在反应器壁结垢，而这些因素是导致光生物反应器频繁关停以便进行机械清洁和灭菌的主要原因[39]。由于微藻细胞易在光生物反应器的光照表面上结垢，因此其清洗成本也很高。

曝气速率是影响光生物反应器中混合、传质和L/D循环的重要参数。向培养液中供给富含CO₂的气体，从而产生混合(可降低pH和营养物浓度梯度、防止细胞沉积、防止死区发生、结块和结垢)、传质(可防止CO₂缺乏、溶解氧中毒和溶解CO₂抑制)和优化的L/D循环。然而，过度曝气会导致细胞损坏(通过增加机械剪切力)和高成本。浆料的速度是防止细胞沉积的重要因素，也可增加有益的L/D循环频率及微藻与反应物CO₂接触的机会。浆液速度可根据细胞的沉降速度选择，一般认为流速为0.1~0.3 m·s⁻¹在光生物反应器中是有效的[65]，更高的速度也有益，但会消耗太多的能量。此外，通气引起的L/D循环虽然对细胞生长有益，但由于中频(0.01~1 Hz)混合在光生物反应器中比较常见，因此其改善效果并不显著[64]。两个研究团队的实验发现[87,88]，光生物反应器中L/D循环的最大频率一般不超过25 Hz，在圆管流速分别为10 m·s⁻¹和0.5 m·s⁻¹的条件下，其频率也分别低于50 Hz和6 Hz[88]。最后，光生物反应器中的细胞运动是混乱的[68]。在大规模培养中，曝气费用约占总成本的三分之一[89]。因此，从经济的角度来看，高曝气速率对大规模培养来说是不切实际的。在微藻的培养中，空气和CO₂的混合气在光生物反应器中的最佳曝气速率已被广泛研究[41,65]。研究结果表明，在大规模微藻培养中，CO₂体积含量为5%~10%、曝气速率为0.025~1 vvm[空气/(介质·时间)]是经济有效的[45]。不同型式的光生物反应器在达到相同传质能力时的曝气量如下：管式光生物反应器为2400~3200 W·m⁻³；鼓泡塔为40 W·m⁻³；平板式光生物反应器为53 W·m⁻³[90]。在平板气升环流式光生物反应器中，8 W·m⁻³的最佳曝气量也足以满足混合和传质的需要[41]。

虽然已经设计了许多新型的光生物反应器,包括设计塑料光导结构[13]和各类静态混合器[64,91]来增加L/D循环的频率,但光生物反应器的清洁水平决定了其寿命。例如,为了实现快速且有益的L/D循环,提出了由挡板或条形物组成混合器的新型光生物反应器[64]。为有利于光的穿透,挡板或条形物宽度一般小于5 cm,然而这些直接固定在光生物反应器壁面上的内构件会使光生物反应器周期性的清洁和维修变得极其困难。因此,为了提高光生物反应器的可清洁性[13],提出了诸如平滑内表面,最小化内构件、弯曲的数量和表面积,以及保持较大内部空间等原则。

总而言之,合理设计光生物反应器至关重要,应综合考虑商业开发的投资成本、运行成本(包括所需辅助能源、清洁和维护的成本)和生命周期等问题。较好的光生物反应器应具有结构简单、操作和温度控制简单、投资低、运行成本低(包括能耗低、清洁和维护方便)、使用寿命长等特点。

3. 光生物反应器的研究进展

迄今为止,除了前面提到各种类型的光生物反应器外,还设计了许多新型的光生物反应器。然而,由于清洁和维修问题导致其实用性低,甚至某些光生物反应器可能还不如传统光生物反应器经久耐用。本文推荐几种最有希望应用于大规模培养光合微生物的光生物反应器,其中包括管式光生物反应器、塑料袋式光生物反应器、柱状气升环流式光生物反应器和平板气升环流式光生物反应器。表1比较了这些光生物反应器的主要优缺点。

3.1. 管式光生物反应器

因为它具有相对较大的可用光照表面积,管式光生物反应器是户外大规模微藻培养最合适和最可行的装置之一。玻璃或塑料管通常用作其制造材料[13,46,82]。为了最大化地捕获阳光,这些透明管可被排列成不同的

形状(如直的、弯曲的或螺旋形的)和方向(如水平的、倾斜的、垂直的或螺旋形的)。微藻培养液通过泵或曝气提供循环的动力。为了提高土地的利用率,这些管子通常排列成水平的栅栏状结构,相应地增加了其运行成本[65]。

管式光生物反应器的直径通常最小为10 mm,最大可达60 mm [16],长度可达数百米。在一些情况下,为了培养高浓度的细胞,也设计10 mm或以下的小直径管式光生物反应器。在大规模培养中,通常采用 $0.2\sim 0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的循环液速[16]。

虽然管式光生物反应器比较受欢迎[92],但它仍然存在许多缺点。在室外培养[13]中,出现光限制现象的情况比较常见,特别是在直径相对较大的管中进行细胞培养。在这种情况下,管中心部分的细胞几乎接受不到光,其生长受到了限制。此外,长管式的光生物反应器还存在一些传质的问题, CO_2 和 O_2 梯度以及培养基溶液出入口之间的pH差别应该受到重视。由于这些传质问题,在通气区通常含有高浓度的溶解 CO_2 ,而在脱气区含有高浓度的溶解氧[91]。在没有气体交换的情况下,管中溶液在离开气液交换区仅1 min后就可能出现氧中毒[16]。因此,从理论上讲,根据潜在的 O_2 累积、 CO_2 耗尽以及其他因素,如方便清洁等,应保持管式光生物反应器的长度尽可能短。此外,由于管式光生物反应器的小直径导致其有效培养体积有限,因此在夏天可能会发生光生物反应器中培养液的温度过高。最后,反应器壁面的清洁程度与光透过性密切相关,清洁管式光生物反应器的壁面是一个令人头痛的问题。目前,机械清洗是最常用的清洁方式[65]。

因此使用管式光生物反应器进行大规模培养时,光限制、 O_2 积累、 CO_2 耗竭、温度难控制、占地面积大和高能耗是其主要问题[82]。

3.2. 塑料袋式光生物反应器

近年来,塑料袋式光生物反应器由于具有成本低廉

表1 四种最有潜力的光生物反应器

Type of PBR	Advantages	Disadvantages
Tubular PBR	Simple; large illumination surface area	High temperature; photolimitation; high pH, CO_2 and O_2 gradients; high capital and operating costs
Plastic bag PBR	Low capital cost in the short term	Photolimitation; bad mixing; frailty to leakage; short lifespan
Column airlift PBR	Low power consumption; low shear stress; good mixing and mass transfer	High capital cost; high cleaning cost
Flat-panel airlift PBR	Low power consumption and shear stress; easy temperature control; good mixing and mass transfer; long lifespan; high ratio of illuminated surface-area-to-volume; low operating cost	High capital cost

的优点而在微藻的商业化生产中得到越来越多的关注[13]。这些袋式光生物反应器可以安装曝气器来提高细胞的产量。图1给出了塑料袋式光生物反应器的实例。塑料袋式光生物反应器可根据体积大小按不同的形式排列。例如,一个体积为5 L的塑料袋式光生物反应器通过悬挂来大规模培养小球藻[93];一个中试培养系统由20个聚乙烯塑料袋组成(每个塑料袋宽20 cm、长2 m,材料厚度为0.2 mm,体积为16 L)并固定在金属支架上,被认为是一种有前景的培养斜生栅藻的光生物反应器[94];有学者也提出了一种平板式光生物反应器,其由位于两个铁架之间、容量为250 L的一次性塑料袋组成[90]。更大容量的塑料袋式光生物反应器可以通过采取浸入水中的方法来方便地控制其在夏季的温度,从而降低成本。塑料袋式光生物反应器甚至可以放入海洋中培养细胞,利用海浪来有效改善混合和传质,可大大降低成本[95]。

虽然塑料袋式光生物反应器受到很多研究者的青睐,但它也有许多缺点。首先,由于重力引起塑料袋易变形、扭曲,常常导致光限制的情况发生。其次,这些光生物反应器可能因混合不佳导致一些区域的细胞生长受到抑制。再次,塑料袋的材质比较脆弱,经常出现渗漏问题,这种情况对于大规模培养来说是灾难性的。还



图1. 塑料袋式光生物反应器实例。

有,由于清洗和泄漏的问题,袋子的使用寿命比较短,从长远来看并不经济。最后,处理大量的塑料袋也是另一个潜在的问题[13]。

3.3. 柱状气升环流式光生物反应器

气升式光生物反应器具有操作能耗低和施加在细胞上的剪切应力小等显著优点。此外,气升式反应器具有固定的流体流动循环和相对较好的气液传质性能。

为了获得足够的光照,气升式光生物反应器的柱子直径不应超过0.2 m,否则,反应器中心的光利用是一个严重的问题[13,45]。此外,由于透明材料强度的限制以及为了减少大规模工业培养中各反应器之间的相互遮蔽,柱子的高度被限定在4 m左右。在气升式反应器中,柱子可以沿直径方向以中心管或平板分开。在前一种情况下,空气可以在中心或底部环隙曝气。

柱状气升环流式光生物反应器是微藻工业生产中最有应用前景的装置之一[96],然而,高投资成本和清洁问题是其大规模应用的主要障碍[97]。

3.4. 平板气升环流式光生物反应器

笔者提出了一种新型平板气升环流式光生物反应器,并获得专利[98]。笔者认为这种光生物反应器是最有希望成功应用于工业大规模微藻培养的反应器之一。反应器如图2所示。

这种类型的光生物反应器将气升式内环流反应器与平板式光生物反应器的突出优点相结合,具有很多优良特性。第一,从经济角度看,其光照比表面积大。第二,在夏季当培养温度超过规定值[99]时,可将水喷洒到光生物反应器的表面上或将光生物反应器的底部浸没在水中来控制其温度。第三,作为气升式内环流反应器,其表现出优异的性能,包括细胞受到的剪切应力小、能耗低[100]、气液传质速率大以及良好循环流动导致的良

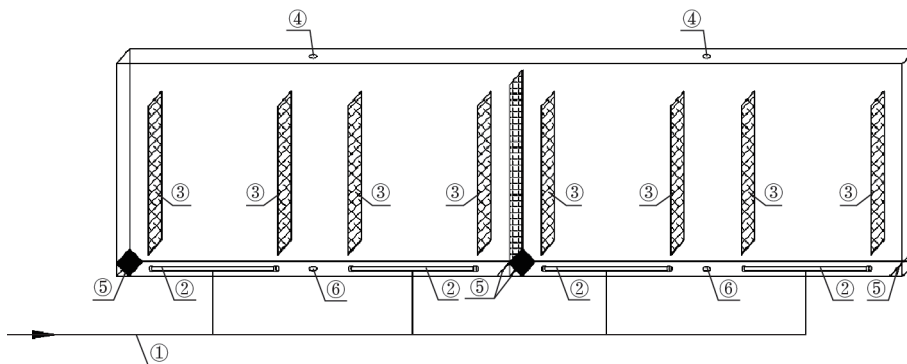


图2. 新型平板气升环流式光生物反应器示意图[98]。①空气供应管;②气体曝气器;③隔板;④通气孔;⑤挡板;⑥浆料排出口。

好混合。第四,这种集成式光生物反应器系统包含四个气升式内环流反应器,形成两个相对独立的组,从而防止当培养基发生泄漏时导致整个系统的崩溃。另外,它具有较大的上升管截面积/降液管截面积比值,体积也高达200 L。因此,如果培养液速度足够高,则完全可以避免细胞在光生物反应器内的沉淀、结块和结垢,并可大大降低曝气成本。最后,这种光生物反应器主要由混凝土和玻璃材料建成,易于清洗,因而具有较长的寿命。一旦建成,可以用于数十年的大规模培养。总之,这种新型的光生物反应器对于未来光合微生物的大规模培养是非常重要的。

值得注意的是,为了获得更好的性能,尽管已经设计出了一些新颖的光生物反应器[101],但是为了清洗方便,在这类反应器中强烈推荐采用简单的内构件,从而使其具有更长的使用寿命。

4. 光生物反应器的仿真研究进展

在光生物反应器中有许多传递过程发生,如光传递、相间动量传递、质量传递和热传递。细胞生长与这些传递参数相耦合,使光生物反应器的设计进一步复杂化。尽管在模拟光生物反应器中的气泡流动方面取得了巨大进步,但一些研究人员仍然认为,由于湍流和相间动量交换[45,102]的模型尚未成熟,采用计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)的方法模拟复杂传递过程更像“艺术”而非“科学”。然而,CFD已经被证明是预测发生在光生物反应器中固有复杂现象的有效工具,对于成功设计和开发商业反应器是非常可靠的。

4.1. 光传递模型

一般认为,光辐射是控制光生物反应器内细胞生长的主要限制因素,穿透培养液的光可以被吸收或散射[68]。由于辐射取决于空间位置和角度方向,在具有吸收和散射性质的介质中,在任何方向、任何位置 r 处的经典光辐射传递方程(RTE)可以表示如下[18]:

$$\frac{dI(\mathbf{r}, \mathbf{s})}{ds} = -aI(\mathbf{r}, \mathbf{s}) - \sigma_s I(\mathbf{r}, \mathbf{s}) + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\mathbf{r}, \mathbf{s}') \Phi(\mathbf{s} \cdot \mathbf{s}') d\Omega' \quad (1)$$

其中, \mathbf{r} , \mathbf{s} 和 \mathbf{s}' 分别为位置矢量、方向矢量和散射方向矢量; s , a , σ_s 和 I 分别为路径长度、吸收系数、散射系数和光强度; Φ 和 Ω' 分别为相位函数和方位角。在上述

的等式中,右边的第一项说明了由于光吸收而导致的光子损失;第二项表示由气泡和细胞的光散射引起的辐射损失;最后一项表示由光散射引起的辐射在某方向的增强,由方向 \mathbf{s}' 散射至 \mathbf{s} 方向的辐射强度的分率 $I(\mathbf{r}, \mathbf{s}')$ 由相位函数 $\Phi(\mathbf{s} \cdot \mathbf{s}')$ 决定。因此,考虑到所有方向的散射,任意一点的总入射强度可以通过下式计算:

$$G(\mathbf{r}) = \int_{\Omega=0}^{\Omega=4\pi} I(\mathbf{r}, \mathbf{s}) d\Omega \quad (2)$$

由于光辐射方程具有积分和微分形式,只能得到一维理想情况下的精确解析解[103,104]。因此,求解光传递方程不是一件简单的事。近年来,已经提出了许多分析和经验模型来估计光生物反应器内的光辐射分布。许多研究人员忽略了光散射,因此一个简化的Beer-Lambert定律被广泛应用[57,105–112]。此外,还发展了一维准平行光存在光吸收和光散射的双通量方法[5,64,113]。在过去几十年中,为了获得光传输方程的精确解,也提出了许多数值方法,其中包括蒙特卡罗方法[114,115]、离散坐标法[102,116]和有限体积法(finite volume method, FVM)[18,117–119]。在这些模型中,由于FVM具有辐射能守恒且易于集成至CFD模拟中等突出优点而受到广泛关注,我们前期的研究已经对该方法进行了发展和广泛验证[98]。

辐射性质(如吸收和散射系数)可以使用由异常衍射近似的广义Lorenz-Mie理论来估计[120]。Wheaton和Krishnamoorthy[102]认为,在较高的细胞浓度下,气泡和细胞的散射效应降低,光吸收成为培养液中光衰减的主导因素。

应当注意的是,即使对于同一物种,也应注意其在特定条件下的光吸收系数。Vejrazka等[58]报道,平均干重的吸收系数与L/D循环无关,但与光的强度有关。发现低辐射($100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)条件下,莱茵藻的吸收系数为 $0.233 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$,而在高辐射($500 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)条件下,该值降低到接近一半,即 $0.127 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 。这个发现与Takache等[5]的研究结果一致,即对于同一种微藻,随着光照强度的增加,色素沉积逐渐减少,其光吸收系数也相应降低。此外,虽然光合作用可在光合有效辐射的全波长范围内进行,并且光吸收和散射系数具有光谱依赖性,但求解光生物反应器的光传递目前仅限于拟单色光辐射,也就是采用平均辐射光源和辐射特性的方法进行计算,从而大幅减少计算成本。由于培养液的衰减系数,也就是光吸收和散射系数的总和是与波长密切相关的(图3),最近已经认识到采用与波长相关的多色光辐

射模型进行计算的重要性[63,102,121]。

对于多色光辐射,必须在光合有效辐射的整个波长(频率)范围内进行积分,任何位置点的总辐射强度可以通过下式进行计算[113,122]:

$$G(\mathbf{r}) = \sum_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} G_{\lambda}(\mathbf{r}) \quad (3)$$

其中, λ_{\min} 和 λ_{\max} 分别为光源的最小和最大光合有效辐射波长; $G_{\lambda}(\mathbf{r})$ 为波长 λ 时的总入射强度。

由于辐射特性与空间、方向和频谱密切相关,光生物反应器内太阳光辐射传输的准确模拟在计算上是一个挑战[102]。基于Berberoglu等[122]一维、稳态辐射的成功模拟,我们发展了一种分区模型来预测光生物反应器中的多色光辐射[121],特别是可用于具有二维或三维几何形状的复杂结构。该方法的详细描述可参考文献[121]。为了简洁起见,本文仅介绍其主要特色。在这种方法中,光合有效辐射被分成几个区域,光辐射性质通过一系列分区来近似[122,123],且使每个分区下的面积等于辐射性质在一定光谱范围内的面积[121]。图3举例说明了采用分区模型计算得到的紫球藻衰减系数。如果只采用一个分区,就相当于单色光辐射的情况。然而,应根据光源的光谱特征和辐射特性分布来确定分区的数量。在图3中,采用了波长为350~580 nm和580~750 nm的两个分区。分区模型被认为是多色光辐射性质的一个可靠近似。

4.2. 光辐射与拉格朗日方法耦合

众所周知,光合转化是一个动态过程,藻液流动导致微藻细胞在反应器内部光照强度各异的位置流动,故

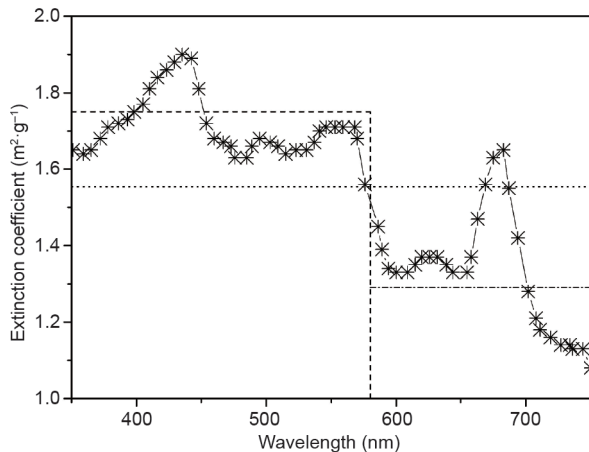


图3. 与波长相关的光衰减系数及应用于紫球藻的分区模型[121]。

细胞位置变化可以改变光子的瞬时转化率和吸收效率[124]。也就是说,流体流动的改变可改变辐射场的空间分布。流场[125-127]、辐射场[18,121]和细胞生长速率[128]在光生物反应器中的分布可以很容易地通过求解动量、质量、辐射传递方程及光催化反应而获得。然而,通过改善流体力学条件来优化光利用率,需要对细胞的光照历史和流动对总体光合反应的影响有详细了解。

辐射和细胞流动历史之间的耦合在理论上是可预测的。欧拉方法通常用于预测流体动力学,细胞的历程可以通过拉格朗日离散相模型来统计细胞的流动轨迹。受到的平均光照强度可通过将每个细胞在连续流动位置的瞬时辐射强度进行平均而得到。将细胞运动轨迹追踪与在空间和时间上的光吸收直接耦合的方法已被许多研究者采用,并取得了较大的成功[88,129-131]。很显然,光反应器内实际的L/D循环可以用这种方法直接确定。在忽略剪切应力的影响后,Pruvost等[124]发现,尽管L/D循环与光合转化之间的动态耦合确实影响细胞的生长,但是仅通过考虑细胞历史轨迹和辐射场之间的线性耦合不可能提升光生物反应器的性能。Vejrazka等[60]还发现,当频率大于1 Hz时,有益L/D循环的光合效率可以通过部分或全部光积分来描述;而在较低光强下,光的全部积分会导致预测的光合效率偏高。总之,尽管将光的辐射传递和拉格朗日流体动力学模型相耦合可以提供与L/D循环相关的重要信息,但是用该方法建立的模型预测光生物反应器内的细胞生长似乎仍然有些不切实际。

4.3. 光辐射、生长模型与欧拉方法的耦合

培养基中细胞的生长与光照强度、流体混合、剪切应力、质量传递和热量传递等有关。深入定量了解混合导致的L/D循环对生物产量的影响至关重要,然而,这方面的研究却遭遇了瓶颈。迄今无这方面的成熟模型,尤其是生长模型缺乏对细胞的光照历史、光抑制、光限制、全局剪切应力、温度、pH、传质和营养等重要环境因素的考虑。这些研究的缺乏可解释为什么到目前为止还没有开发出比较理想的工业光生物反应器以及为什么只有几个采用半经验模型的例子针对这个方面进行研究。

Muller-Feuga等[132]建立了一个集成数学模型,其中包括求解单色光辐射的简化Beer-Lambert定律、平推流的流动模型及考虑了光抑制、光限制和L/D循环的光

合生长模型，分别对间歇和连续生产的管式光生物反应器中的微藻培养成功地进行了相关研究。我们通过上面提到的分区模型来近似多色光辐射并采用已验证的有限体积法求解光辐射[121]，从而提供了光生物反应器中光辐射的完整解决方案，建立了一个集成数学模型进行光生物反应器的设计。在我们的研究中很好地说明了采用与光谱相关的辐射模拟的重要性，讨论了分区数量和L/D循环对细胞总体生长的影响，其间歇和连续培养的相应结果如图4和图5所示。我们的研究结果[121]形象地描绘了在整个培养期间光生物反应器内光强的时空变化；从光生物反应器内光传输的角度出发，提供了最大限度提高细胞产量的指导方针是在时间和空间上尽可能保持光的均匀分布。

Eilers和Peeters[133]建立了一个考虑了光生物反应器内的光饱和、光抑制和总体剪切力的生长动力学模型，该模型通过将生理学第一原理与流体力学相结合来描述光合作用。该模型的一个重要创新在于它基于光合单元的概念来描述光合作用，光合单元也被称为“光合

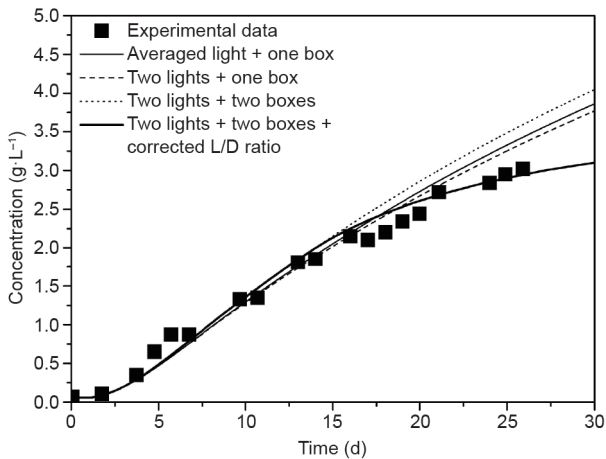


图4. 以欧拉观点建立的辐射模型对间歇培养预测结果的影响[121]。

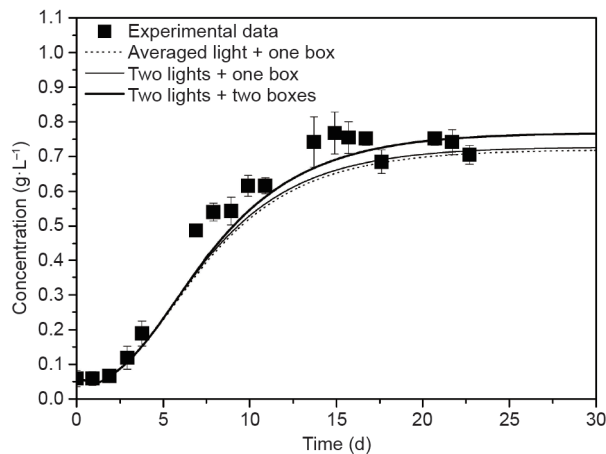


图5. 以欧拉观点建立的辐射模型对连续培养预测结果的影响[121]。

作用工厂”(photosynthetic factories, PSF)，并且根据入射的光照强度释放出电子并最终产生氧[4,57,133]。由于在低光照强度下，光合作用受光子捕获速率的限制，光合作用的反应速率被认为与所接受的光照强度成正比。当光照强度增加到临界值时，由于使用光子的能力有限，微生物变得“光饱和”。如果光照强度超过了抑制水平，光合作用的速率会急剧下降。

如果培养液中的营养成分是过剩的，则光是影响光合作用的主要因素。该生长模型将光合成工厂视为包含反应中心和相关辅助单元的光子捕获系统总和。光子的捕获系统可以被一定量的光能开启从而产生特定量的光产物[105]。PSF模型中定义了三个状态：静止状态(开放状态，指定为 x_1)、活化状态(关闭状态，指定为 x_2)和抑制状态(指定为 x_3)。图6示意了PSF模型的转化过程。

在PSF进程开始时，微藻处于开放状态 x_1 ，准备好捕获光子。一旦光子被捕获，生化反应开始，微藻转变为激活态 x_2 。该过程的反应速率被认为是与光照强度相关的一级反应。在激活状态 x_2 下，微藻在光暗区可以释放捕获的光子并返回到开放状态 x_1 ，也可以在光照区捕捉到另一个光子，然后转变为抑制状态 x_3 。这两个反应的速率都假设为零级，它们可以分别由速率常数 γ 和 β 确定。此外，在抑制状态下，微藻也可以以速率常数 δ 恢复到开放状态 x_1 。该过程用动力学方程式表示如下：

$$\frac{dx_1}{dt} = -\alpha I x_1 + \gamma x_2 + \delta x_3 \quad (4)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = \alpha I x_1 - \gamma x_2 - \beta I x_2 \quad (5)$$

$$\frac{dx_3}{dt} = \beta I x_2 - \delta x_3 \quad (6)$$

$$\mu = k \gamma x_2 - \tau_0 \quad (7)$$

$$x_1 + x_2 + x_3 = 1.0 \quad (8)$$

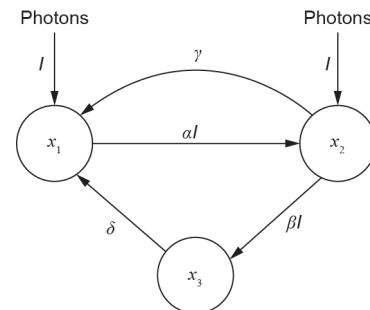


图6. PSF模型示意图[133]。

其中, α , β , γ , δ 和 k 为速率常数; μ 为微藻的生长速率; τ_0 为维持项; t 和 I 分别为时间和光强。

上述基于机理的PSF模型考虑了光适应动力学、过量光照、光照不足及流体剪切对细胞生长的影响。因此, 该模型可以说是科学设计工业光生物反应器的一个里程碑[57]。这种模型已在实验室规模的鼓泡光生物反应器和气升式内环流光生物反应器中取得了很大的成功[105,106]。在PSF模型中, 除了考虑剪切应力、光抑制和光限制的影响外, 细胞流动历史对其生长的影响(即L/D循环对细胞生长的影响)可以通过拉格朗日方法很好地描述。然而, 当采用稳态欧拉模型时, 由于该模型忽略了培养基流动对三个状态的影响, 这种方法仍然存在着严重的缺陷, 并且该模型也不能与CFD模型相集成来预测细胞的总体生长速率。经过努力, 我们最近成功地解决了这个问题, 相关成果将在未来的工作中进行详细阐述。

5. 结论与展望

光生物反应器被认为是利用环境友好的光合微生物进行大规模生产目标产品的最重要的装置, 它们在绿色化学行业发挥着重要作用。虽然已经取得了显著成绩, 但迄今大部分的光生物反应器仍然是采用半经验方法进行设计。如果培养基中的营养充足, 光合微生物的生长也是一个复杂的过程, 受到许多环境因素如光、混合、传质、温度和pH等因素的影响。然而在工业光生物反应器中, 运行成本包括温度控制、定期清洁和维修等费用通常被低估, 新型光生物反应器的使用寿命也被许多研究人员忽视。应当对光生物反应器的效率、投资和运行成本以及使用寿命进行仔细权衡。本文推荐了四类最有前景、可用于大规模工业化培养的光生物反应器, 即管式光生物反应器、塑料袋式光生物反应器、柱状气升环流式光生物反应器和平板气升环流式光生物反应器。

迄今为止, 由于存在的现实困难(如投资成本、运行成本和寿命)以及对光分布(如多色光传输、光抑制、光限制以及由混合导致有益的L/D循环)和环境因素(即细胞所受剪切力、营养液成分和浓度、pH、温度、溶解CO₂缺乏、溶解CO₂和溶解氧的毒性水平)对细胞生长的影响的了解有限, 理想的可用于微藻大规模培养的光生物反应器并不存在。此外, 即使细胞在绝对理想条件下培养, 但流体动力学、多色光辐射和细胞生长之间的

强耦合使光生物反应器设计进一步复杂化, 到现在为止, 仍可以独立获得这些问题的解。因此迫切需要建立基于机理的生长动力学模型, 从而可以容易地与欧拉模型相结合来描述细胞经历的L/D循环, 有利于科学设计光生物反应器。以欧拉观点和创新的PSF模型为基础, 在细胞生长与流体流动之间建立相互沟通桥梁对于其未来的成功应用是至关重要的。

值得注意的是, 近年来已经开发了一种被称为多孔基质生物反应器(porous substrate bioreactor, PSBR)的新技术, 其细胞被固定在致密的生物膜培养基中, 具有解决许多与体积相关问题的优点[134]。PSBR技术由于结构简单且低能耗, 其前景被看好。然而, 由于存在诸如细胞从生物膜表面脱离、污染、大量水分通过蒸发而被消耗等问题, PSBR技术还处于中试的示范阶段。我们尚不能确定这两种技术(即光生物反应器中的悬浮技术和PSBR中的固定培养技术)哪种技术更好, 这取决于技术进步和市场情况。

致谢

感谢国家重点研发计划(2016YFB0301701)、国家自然科学基金(91434114, 21376254)、国家重大科学仪器研制项目(21427814)、中国科学院仪器研制项目(YZ201641)和中国科学院过程工程研究所创新团队国际合作伙伴计划的资助, 也感谢中国科技大学超级计算中心提供的技术支持。

Compliance with ethics guidelines

Qingshan Huang, Fuhua Jiang, Lianzhou Wang, and Chao Yang declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

- [1] Knuckey RM, Brown MR, Robert R, Frampton DMF. Production of microalgal concentrates by flocculation and their assessment as aquaculture feeds. *Aquacult Eng* 2006;35(3):300–13.
- [2] Takache H, Pruvost J, Marec H. Investigation of light/dark cycles effects on the photosynthetic growth of *Chlamydomonas reinhardtii* in conditions representative of photobioreactor cultivation. *Algal Res* 2015;8:192–204.
- [3] Shi XM, Jiang Y, Chen F. High-yield production of lutein by the green microalga *Chlorella protothecoides* in heterotrophic fed-batch culture. *Biotechnol Progr* 2002;18(4):723–7.
- [4] Solimeno A, Samsó R, Uggetti E, Sialve B, Steyer JP, Gabarró A, et al. New mechanistic model to simulate microalgae growth. *Algal Res* 2015;12:350–8.
- [5] Takache H, Christophe C, Cornet JF, Pruvost J. Experimental and theoretical assessment of maximum productivities for the microalgae *Chlamydomonas reinhardtii* in two different geometries of photobioreactors. *Biotechnol Progr* 2010;26(2):431–40.

- [6] Yan N, Fan C, Chen Y, Hu Z. The potential for microalgae as bioreactors to produce pharmaceuticals. *Int J Mol Sci* 2016;17(6):962.
- [7] Del Campo JA, García-González M, Guerrero MG. Outdoor cultivation of microalgae for carotenoid production: Current state and perspectives. *Appl Microbiol Biotechnol* 2007;74(6):1163–74.
- [8] Lan CQ, Wang B. *Microalgae for biofuel production and CO₂ sequestration*. Hauppauge: Nova Science Publishers; 2010.
- [9] Wang B, Lan CQ. Biomass production and nitrogen and phosphorus removal by the green alga *Neochloris oleoabundans* in simulated wastewater and secondary municipal wastewater effluent. *Bioresour Technol* 2011;102(10):5639–44.
- [10] Abu-Ghosh S, Fixler D, Dubinsky Z, Iluz D. Continuous background light significantly increases flashing-light enhancement of photosynthesis and growth of microalgae. *Bioresour Technol* 2015;187:144–8.
- [11] Batan LY, Graff GD, Bradley TH. Techno-economic and Monte Carlo probabilistic analysis of microalgae biofuel production system. *Bioresour Technol* 2016;219:45–52.
- [12] Rodionova MV, Poudyal RS, Tiwari I, Voloshin RA, Zharmukhamedov SK, Nam HG, et al. Biofuel production: Challenges and opportunities. *Int J Hydrogen Energy* 2017;42(12):8450–61.
- [13] Wang B, Lan CQ, Horsman M. Closed photobioreactors for production of microalgal biomasses. *Biotechnol Adv* 2012;30(4):904–12.
- [14] Voloshin RA, Rodionova MV, Zharmukhamedov SK, Veziroglu TN, Allakhverdiev SI. Review: Biofuel production from plant and algal biomass. *Int J Hydrogen Energy* 2016;41(39):17257–73.
- [15] Raeesosadati MJ, Ahmadzadeh H, McHenry MP, Moheimani NR. CO₂ bioremediation by microalgae in photobioreactors: Impacts of biomass and CO₂ concentrations, light, and temperature. *Algal Res* 2014;6(Part A):78–85.
- [16] Posten C. Design principles of photo-bioreactors for cultivation of microalgae. *Eng Life Sci* 2009;9(3):165–77.
- [17] Richmond A. Principles for attaining maximal microalgal productivity in photobioreactors: An overview. *Hydrobiologia* 2004;512(1):33–7.
- [18] Huang Q, Liu T, Yang J, Yao L, Gao L. Evaluation of radiative transfer using the finite volume method in cylindrical photoreactors. *Chem Eng Sci* 2011;66(17):3930–40.
- [19] Oncel S, Vardar Sukan F. Comparison of two different pneumatically mixed column photobioreactors for the cultivation of *Arthrospira platensis* (*Spirulina platensis*). *Bioresour Technol* 2008;99(11):4755–60.
- [20] Degen J, Uebele A, Retze A, Schmid-Staiger U, Trösch W. A novel airlift photobioreactor with baffles for improved light utilization through the flashing light effect. *J Biotechnol* 2001;92(2):89–94.
- [21] Ogbonna J, Ichige E, Tanaka H. Interactions between photoautotrophic and heterotrophic metabolism in photoheterotrophic cultures of *Euglena gracilis*. *Appl Microbiol Biotechnol* 2002;58(4):532–8.
- [22] Zittelli GC, Rodolfini L, Tredici MR. Mass cultivation of *Nannochloropsis* sp. in annular reactors. *J Appl Phycol* 2003;15(2):107–14.
- [23] Ranjbar R, Inoue R, Katsuda T, Yamaji H, Katoh S. High efficiency production of astaxanthin in an airlift photobioreactor. *J Biosci Bioeng* 2008;106(2):204–7.
- [24] Rubio FC, Fernández FGA, Pérez JAS, Camacho FG, Grima EM. Prediction of dissolved oxygen and carbon dioxide concentration profiles in tubular photobioreactors for microalgal culture. *Biotechnol Bioeng* 1999;62(1):71–86.
- [25] Ugwu C, Ogbonna J, Tanaka H. Improvement of mass transfer characteristics and productivities of inclined tubular photobioreactors by installation of internal static mixers. *Appl Microbiol Biotechnol* 2002;58(5):600–7.
- [26] Harker M, Tsavalos AJ, Young AJ. Autotrophic growth and carotenoid production of *Haematococcus pluvialis* in a 30 liter air-lift photobioreactor. *J Ferment Bioeng* 1996;82(2):113–8.
- [27] Kaewpintong K, Shotipruk A, Powtongsook S, Pavasant P. Photoautotrophic high-density cultivation of vegetative cells of *Haematococcus pluvialis* in airlift bioreactor. *Bioresour Technol* 2007;98(2):288–95.
- [28] Hu Q, Guterman H, Richmond A. A flat inclined modular photobioreactor for outdoor mass cultivation of photoautotrophs. *Biotechnol Bioeng* 1996;51(1):51–60.
- [29] Zhang T. Dynamics of fluid and light intensity in mechanically stirred photobioreactor. *J Biotechnol* 2013;168(1):107–16.
- [30] Ogbonna JC, Soejima T, Tanaka H. An integrated solar and artificial light system for internal illumination of photobioreactors. *J Biotechnol* 1999;70(1–3):289–97.
- [31] Richmond A, Boussiba S, Vonshak A, Kopel R. A new tubular reactor for mass production of microalgae outdoors. *J Appl Phycol* 1993;5(3):327–32.
- [32] Hall DO, Acíen Fernández FG, Guerrero EC, Rao KK, Grima EM. Outdoor helical tubular photobioreactors for microalgal production: Modeling of fluid-dynamics and mass transfer and assessment of biomass productivity. *Biotechnol Bioeng* 2003;82(1):62–73.
- [33] Contreras A, García F, Molina E, Merchuk JC. Interaction between CO₂-mass transfer, light availability, and hydrodynamic stress in the growth of *Phaeodactylum tricoratum* in a concentric tube airlift photobioreactor. *Biotechnol Bioeng* 1998;60(3):317–25.
- [34] Watanabe Y, Saiki H. Development of a photobioreactor incorporating *Chlorella* sp. for removal of CO₂ in stack gas. *Energy Convers Manage* 1997;38:499–503.
- [35] Pruvost J, Pottier L, Legrand J. Numerical investigation of hydrodynamic and mixing conditions in a torus photobioreactor. *Chem Eng Sci* 2006;61(14):4476–89.
- [36] Chetsumon A, Umeda F, Maeda I, Yagi K, Mizoguchi T, Miura Y. Broad spectrum and mode of action of an antibiotic produced by *Scytonema* sp. TISTR 8208 in a seaweed-type bioreactor. *Appl Biochem Biotechnol* 1998;70–72(1):249–56.
- [37] Kumar K, Dasgupta CN, Nayak B, Lindblad P, Das D. Development of suitable photobioreactors for CO₂ sequestration addressing global warming using green algae and cyanobacteria. *Bioresour Technol* 2011;102(8):4945–53.
- [38] Moheimani NR, Isdepsky A, Lisec J, Raes E, Borowitzka MA. Coccolithophorid algae culture in closed photobioreactors. *Biotechnol Bioeng* 2011;108(9):2078–87.
- [39] Singh RN, Sharma S. Development of suitable photobioreactor for algae production—A review. *Renewable Sustainable Energy Rev* 2012;16(4):2347–53.
- [40] Sforza E, Simionato D, Giacometti GM, Bertuccio A, Morosinotto T. Adjusted light and dark cycles can optimize photosynthetic efficiency in algae growing in photobioreactors. *PLoS ONE* 2012;7(6):e38975.
- [41] Guo X, Yao L, Huang Q. Aeration and mass transfer optimization in a rectangular airlift loop photobioreactor for the production of microalgae. *Bioresour Technol* 2015;190:189–95.
- [42] Melis A. Solar energy conversion efficiencies in photosynthesis: Minimizing the chlorophyll antennae to maximize efficiency. *Plant Sci* 2009;177(4):272–80.
- [43] Yang Q, Pehkonen SO, Ray MB. Evaluation of three different lamp emission models using novel application of potassium ferrioxalate actinometry. *Ind Eng Chem Res* 2004;43(4):948–55.
- [44] Merchuk JC, Wu X. Modeling of photobioreactors: Application to bubble column simulation. *J Appl Phycol* 2003;15(2):163–9.
- [45] Bitog JP, Lee IB, Lee CG, Kim KS, Hwang HS, Hong SW, et al. Application of computational fluid dynamics for modeling and designing photobioreactors for microalgae production: A review. *Comput Electron Agric* 2011;76(2):131–47.
- [46] Iluz D, Abu-Ghosh S. A novel photobioreactor creating fluctuating light from solar energy for a higher light-to-biomass conversion efficiency. *Energy Convers Manage* 2016;126:767–73.
- [47] Zhang K, Kurano N, Miyachi S. Outdoor culture of a cyanobacterium with a vertical flat-plate photobioreactor: Effects on productivity of the reactor orientation, distance setting between the plates, and culture temperature. *Appl Microbiol Biotechnol* 1999;52(6):781–6.
- [48] Zhang K, Miyachi S, Kurano N. Photosynthetic performance of a cyanobacterium in a vertical flat-plate photobioreactor for outdoor microalgal production and fixation of CO₂. *Biotechnol Lett* 2001;23(1):21–6.
- [49] Zemke PE, Sommerfeld MR, Hu Q. Assessment of key biological and engineering design parameters for production of *Chlorella zofingiensis* (*Chlorophyceae*) in outdoor photobioreactors. *Appl Microbiol Biotechnol* 2013;97(12):5645–55.
- [50] Shang H, Scott JA, Shepherd SH, Ross GM. A dynamic thermal model for heating microalgae incubator ponds using off-gas. *Chem Eng Sci* 2010;65(16):4591–7.
- [51] Anjos M, Fernandes BD, Vicente AA, Teixeira JA, Dragone G. Optimization of CO₂ bio-mitigation by *Chlorella vulgaris*. *Bioresour Technol* 2013;139:149–54.
- [52] Carvalho AP, Meireles LA, Malcata FX. Microalgal reactors: A review of enclosed system designs and performances. *Biotechnol Progr* 2006;22(6):1490–506.
- [53] Acíen Fernández FG, Fernández Sevilla JM, Molina Grima E. Photobioreactors for the production of microalgae. *Rev Environ Sci Bio* 2013;12(2):131–51.
- [54] Huang Q, Zhang W, Zhang G. Airlift loop reactors. In: Yang C, Mao ZS. Numerical simulation of multiphase reactors with continuous liquid phase, London: Elsevier Academic Press; 2014, p.153–230.
- [55] Xue S, Zhang Q, Wu X, Yan C, Cong W. A novel photobioreactor structure using optical fibers as inner light source to fulfill flashing light effects of microalgae. *Bioresour Technol* 2013;138:141–7.
- [56] Grobbelaar JU. The influence of light/dark cycles in mixed algal cultures on their productivity. *Bioresour Technol* 1991;38(2):189–94.
- [57] García-Camacho F, Sánchez-Mirón A, Molina-Grima E, Camacho-Rubio F, Merchuk JC. A mechanistic model of photosynthesis in microalgae including photoacclimation dynamics. *J Theor Biol* 2012;304:1–15.
- [58] Vejrazka C, Janssen M, Streefland M, Wijffels RH. Photosynthetic efficiency of *Chlamydomonas reinhardtii* in flashing light. *Biotechnol Bioeng* 2011;108(12):2905–13.
- [59] Abu-Ghosh S, Fixler D, Dubinsky Z, Iluz D. Flashing light in microalgae biotechnology. *Bioresour Technol* 2016;203:357–63.
- [60] Vejrazka C, Streefland M, Wijffels RH, Janssen M. The role of an electron pool in algal photosynthesis during sub-second light–dark cycling. *Algal Res* 2015;12:43–51.
- [61] Vejrazka C, Janssen M, Streefland M, Wijffels RH. Photosynthetic efficiency of *Chlamydomonas reinhardtii* in attenuated, flashing light. *Biotechnol Bioeng* 2012;109(10):2567–74.
- [62] Kliphuis AMJ, de Winter L, Vejrazka C, Martens DE, Janssen M, Wijffels RH. Photosynthetic efficiency of *Chlorella sorokiniana* in a turbulently mixed short light-path photobioreactor. *Biotechnol Progr* 2010;26(3):687–96.
- [63] Zijffers JWF, Schippers KJ, Zheng K, Janssen M, Tramper J, Wijffels RH. Maximum photosynthetic yield of green microalgae in photobioreactors. *Mar Biotechnol* 2010;12(6):708–18.
- [64] Huang J, Li Y, Wan M, Yan Y, Feng F, Qu X, et al. Novel flat-plate photobioreactors for microalgae cultivation with special mixers to promote mixing along the light gradient. *Bioresour Technol* 2014;159:8–16.

- [65] Zhu J, Rong J, Zong B. Factors in mass cultivation of microalgae for biodiesel. *Chin J Catal* 2013;34(1):80–100.
- [66] Katsuda T, Shiraishi H, Ishizu N, Ranjbar R, Katoh S. Effect of light intensity and frequency of flashing light from blue light emitting diodes on astaxanthin production by *Haematococcus pluvialis*. *J Biosci Bioeng* 2008;105(3):216–20.
- [67] Wu X, Merchuk JC. A model integrating fluid dynamics in photosynthesis and photoinhibition processes. *Chem Eng Sci* 2001;56(11):3527–38.
- [68] Grobbelaar JU. Factors governing algal growth in photobioreactors: The “open” versus “closed” debate. *J Appl Phycol* 2008;21(5):489–92.
- [69] Chisti Y. Biodiesel from microalgae. *Biotechnol Adv* 2007;25(3):294–306.
- [70] Ugwu CU, Aoyagi H, Uchiyama H. Influence of irradiance, dissolved oxygen concentration, and temperature on the growth of *Chlorella sorokiniana*. *Photosynthetica* 2007;45(2):309–11.
- [71] Pegallapati AK, Nirmalakhanda N. Internally illuminated photobioreactor for algal cultivation under carbon dioxide-supplementation: Performance evaluation. *Renewable Energy* 2013;56:129–35.
- [72] Chiu SY, Kao CY, Chen CH, Kuan TC, Ong SC, Lin CS. Reduction of CO₂ by a high-density culture of *Chlorella* sp. in a semicontinuous photobioreactor. *Bioresour Technol* 2008;99(9):3389–96.
- [73] Xing Z, Zong X, Pan J, Wang L. On the engineering part of solar hydrogen production from water splitting: Photoreactor design. *Chem Eng Sci* 2013;104:125–46.
- [74] Singh SP, Singh P. Effect of temperature and light on the growth of algae species: A review. *Renewable Sustainable Energy Rev* 2015;50:431–44.
- [75] Ugwu CU, Aoyagi H. Influence of shading inclined tubular photobioreactor surfaces on biomass productivity of *C. sorokiniana*. *Photosynthetica* 2008;46(2):283–85.
- [76] Prakash J, Pushparaj B, Carlozzi P, Torzillo G, Montaini E, Materassi R. Microalgal biomass drying by a simple solar device. *Int J Solar Energy* 1997;18(4):303–11.
- [77] Carozzi P, Pushparaj B, Degl’Innocenti A, Capperucci A. Growth characteristics of *Rhodospseudomonas palustris* cultured outdoors, in an underwater tubular photobioreactor, and investigation on photosynthetic efficiency. *Appl Microbiol Biotechnol* 2006;73(4):789–95.
- [78] Watanabe Y, de la Noüe J, Hall DO. Photosynthetic performance of a helical tubular photobioreactor incorporating the cyanobacterium *Spirulina platensis*. *Biotechnol Bioeng* 2011;47(2):261–69.
- [79] Georgianna DR, Mayfield SP. Exploiting diversity and synthetic biology for the production of algal biofuels. *Nature* 2012;488(7411):329–35.
- [80] Acíen Fernández FG, García Camacho F, Sánchez Pérez JA, Fernández Sevilla JM, Molina Grima E. Modeling of biomass productivity in tubular photobioreactors for microalgal cultures: Effects of dilution rate, tube diameter, and solar irradiance. *Biotechnol Bioeng* 1998;58(6):605–16.
- [81] Berberoglu H, Pilon L, Melis A. Radiation characteristics of *Chlamydomonas reinhardtii* CC125 and its truncated chlorophyll antenna transformants *tlat1*, *tlax* and *tlat1-CW*. *Int J Hydrogen Energy* 2008;33(22):6467–83.
- [82] Vasumathi KK, Premalatha M, Subramanian P. Parameters influencing the design of photobioreactor for the growth of microalgae. *Renewable Sustainable Energy Rev* 2012;16(7):5443–50.
- [83] Fan LH, Zhang YT, Zhang L, Chen HL. Evaluation of a membrane-sparged helical tubular photobioreactor for carbon dioxide biofixation by *Chlorella vulgaris*. *J Membr Sci* 2008;325(1):336–45.
- [84] Li S. The dynamics of CO₂ fixation by microalgae [dissertation]. Qingdao: Qingdao Institute of Bioenergy and Bioprocess Technology, Chinese Academy of Sciences; 2013.
- [85] Iglesias-Rodríguez MD, Nimer NA, Merrett MJ. Carbon dioxide-concentrating mechanism and the development of extracellular carbonic anhydrase in the marine picoeukaryote *Micromonas pusilla*. *New Phytol* 1998;140(4):685–90.
- [86] Moheimani NR, Borowitzka MA. Increased CO₂ and the effect of pH on growth and calcification of *Pleurochrysis carterae* and *Emiliania huxleyi* (Haptophyta) in semicontinuous cultures. *Appl Microbiol Biotechnol* 2011;90(4):1399–407.
- [87] Luo HP, Kemoun A, Al-Dahhan MH, Sevilla JMF, Sánchez JLGa, Camacho FGa, et al. Analysis of photobioreactors for culturing high-value microalgae and cyanobacteria via an advanced diagnostic technique: CARPT. *Chem Eng Sci* 2003;58(12):2519–27.
- [88] Perner-Nochta I, Posten C. Simulations of light intensity variation in photobioreactors. *J Biotechnol* 2007;131(3):276–85.
- [89] Berenguel M, Rodríguez F, Acíen FG, García JL. Model predictive control of pH in tubular photobioreactors. *J Process Control* 2004;14(4):377–87.
- [90] Sierra E, Acíen FG, Fernández JM, García JL, González C, Molina E. Characterization of a flat plate photobioreactor for the production of microalgae. *Chem Eng J* 2008;138(1–3):136–47.
- [91] Ugwu C, Ogbonna J, Tanaka H. Design of static mixers for inclined tubular photobioreactors. *J Appl Phycol* 2003;15(2):217–23.
- [92] Vree JH, Bosma R, Janssen M, Barbosa MJ, Wijffels RH. Comparison of four outdoor pilot-scale photobioreactors. *Biotechnol Biofuels* 2015;8(1):215.
- [93] Chen CY, Chang JS, Chang HY, Chen TY, Wu JH, Lee WL. Enhancing microalgal oil/lipid production from *Chlorella sorokiniana* CY1 using deep-sea water supplemented cultivation medium. *Biochem Eng J* 2013;77:74–81.
- [94] Abomohra AEF, El-Sheekh M, Hanelt D. Pilot cultivation of the chlorophyte microalga *Scenedesmus obliquus* as a promising feedstock for biofuel. *Biomass Bioenergy* 2014;64:237–44.
- [95] Kim ZH, Park H, Hong SJ, Lim SM, Lee CG. Development of a floating photobioreactor with internal partitions for efficient utilization of ocean wave into improved mass transfer and algal culture mixing. *Bioprocess. Biosyst. Eng* 2016;39(5):713–23.
- [96] Huang J, Ying J, Fan F, Yang Q, Wang J, Li Y. Development of a novel multi-column airlift photobioreactor with easy scalability by means of computational fluid dynamics simulations and experiments. *Bioresour Technol* 2016;222:399–407.
- [97] Soman A, Shastri Y. Optimization of novel photobioreactor design using computational fluid dynamics. *Appl Energy* 2015;140:246–55.
- [98] Huang Q, Yao L, Guo X. A device consisted of airlift flat-panel photobioreactors for the cultivation of photosynthetic microorganism. China patent, Appl Num: 201510478717.1. 2015.
- [99] Dasgupta CN, Jose Gilbert J, Lindblad P, Heidorn T, Borgvang SA, Skjanes K, et al. Recent trends on the development of photobiological processes and photobioreactors for the improvement of hydrogen production. *Int J Hydrogen Energy* 2010;35(19):10218–38.
- [100] Meiser A, Schmid-Staiger U, Trösch W. Optimization of eicosapentaenoic acid production by *Phaeodactylum tricornutum* in the flat panel airlift (FPA) reactor. *J Appl Phycol* 2004;16(3):215–25.
- [101] Huang J, Feng F, Wan M, Ying J, Li Y, Qu X, et al. Improving performance of flat-plate photobioreactors by installation of novel internal mixers optimized with computational fluid dynamics. *Bioresour Technol* 2015;182:151–9.
- [102] Wheaton ZC, Krishnamoorthy G. Modeling radiative transfer in photobioreactors for algal growth. *Comput Electron Agric* 2012;87:64–73.
- [103] Pareek VK, Cox SJ, Brungs MP, Young B, Adesina AA. Computational fluid dynamic (CFD) simulation of a pilot-scale annular bubble column photocatalytic reactor. *Chem Eng Sci* 2003;58(3–6):859–65.
- [104] Denny F, Scott J, Pareek V, Pareek V, Ding P, G, Amal R. CFD modelling for a TiO₂-coated glass-bead photoreactor irradiated by optical fibres: Photocatalytic degradation of oxalic acid. *Chem Eng Sci* 2009;64(8):1695–706.
- [105] Wu X, Merchuk JC. Simulation of algae growth in a bench-scale bubble column reactor. *Biotechnol Bioeng* 2002;80(2):156–68.
- [106] Wu X, Merchuk JC. Simulation of algae growth in a bench scale internal loop airlift reactor. *Chem Eng Sci* 2004;59(14):2899–912.
- [107] Janssen M, Janssen M, de Winter M, Tramper J, Mur LR, Snel J, et al. Efficiency of light utilization of *Chlamydomonas reinhardtii* under medium-duration light/dark cycles. *J Biotechnol* 2000;78(2):123–37.
- [108] Suh IS, Lee SB. A light distribution model for an internally radiating photobioreactor. *Biotechnol Bioeng* 2003;82(2):180–89.
- [109] Benson BC, Gutierrez-Wing MT, Rusch KA. The development of a mechanistic model to investigate the impacts of the light dynamics on algal productivity in a Hydraulically Integrated Serial Turbidostat Algal Reactor (HISTAR). *Aquacult Eng* 2007;36(2):198–211.
- [110] Bosma R, van Zessen E, Reith JH, Tramper J, Wijffels RH. Prediction of volumetric productivity of an outdoor photobioreactor. *Biotechnol Bioeng* 2007;97(5):1108–20.
- [111] Elyasi S, Taghipour F. Simulation of UV photoreactor for degradation of chemical contaminants: Model development and evaluation. *Environ Sci Technol* 2010;44(6):2056–63.
- [112] Li D, Xiong K, Li W, Yang Z, Liu C, Feng X, et al. Comparative study in liquid-phase heterogeneous photocatalysis: Model for photoreactor scale-up. *Ind Eng Chem Res* 2010;49(18):8397–405.
- [113] Pottier L, Pruvost J, Deremetz J, Cornet JF, Legrand J, Dussap CG. A fully predictive model for one-dimensional light attenuation by *Chlamydomonas reinhardtii* in a torus photobioreactor. *Biotechnol Bioeng* 2005;91(5):569–82.
- [114] Santos PD, Lani A. An object-oriented implementation of a parallel Monte Carlo code for radiation transport. *Comput Phys Commun* 2016;202:233–61.
- [115] Rochatte V, Dahi G, Eskandari A, Dauchet J, Gros F, Roudet M, et al. Radiative transfer approach using Monte Carlo Method for actinometry in complex geometry and its application to Reinecke salt photodissociation within innovative pilot-scale photo(bio)reactors. *Chem Eng J* 2017;308:940–53.
- [116] Trujillo Francisco J, Lee Ivy AL, Hsu CH, Safinski T, Adesina Adesoji A. Hydrodynamically-enhanced light intensity distribution in an externally-irradiated novel aerated photoreactor: CFD simulation and experimental studies. *Int J Chem Reactor Eng* 2008;6(1):58.
- [117] Ben Salah M, Askri F, Slimi K, Ben Nasrallah S. Numerical resolution of the radiative transfer equation in a cylindrical enclosure with the finite-volume method. *Int J Heat Mass Transfer* 2004;47(10–11):2501–9.
- [118] Pareek V, Chong S, Tade M, Adesina AA. Light intensity distribution in heterogeneous photocatalytic reactors. *Asia-Pac J Chem Eng* 2008;3(2):171–201.
- [119] Chai JC, Lee HS, Patankar SV. Finite-volume method for radiation heat transfer. *J Thermophys Heat Transfer* 1994;8(3):419–25.
- [120] van de Hulst HC. Light scattering by small particles. 2nd ed. New York: Dover Publications; 1981.
- [121] Huang Q, Yao L, Liu T, Yang J. Simulation of the light evolution in an annular photobioreactor for the cultivation of *Porphyridium cruentum*. *Chem Eng Sci* 2012;84:718–26.
- [122] Berberoglu H, Yin J, Pilon L. Light transfer in bubble sparged photobioreactors for H₂ production and CO₂ mitigation. *Int J Hydrogen Energy* 2007;32(13):2273–85.
- [123] Modest MF. Radiative heat transfer. 2nd ed. New York: Academic Press; 2003.
- [124] Pruvost J, Cornet JF, Legrand J. Hydrodynamics influence on light conversion

- in photobioreactors: An energetically consistent analysis. *Chem Eng Sci* 2008;63(14):3679–94.
- [125] Huang Q, Yang C, Yu G, Mao ZS. 3-D simulations of an internal airlift loop reactor using a steady two-fluid model. *Chem Eng Technol* 2007;30(7):870–9.
- [126] Huang Q, Yang C, Yu G, Mao ZS. CFD simulation of hydrodynamics and mass transfer in an internal airlift loop reactor using a steady two-fluid model. *Chem Eng Sci* 2010;65(20):5527–36.
- [127] Huang Q, Zhang W, Yang C. Modeling transport phenomena and reactions in a pilot slurry airlift loop reactor for direct coal liquefaction. *Chem Eng Sci* 2015;135:441–51.
- [128] Lee E, Jalalizadeh M, Zhang Q. Growth kinetic models for microalgae cultivation: A review. *Algal Res* 2015;12:497–512.
- [129] Pruvost J, Legrand J, Legentilhomme P, Muller-Feuga A. Simulation of microalgae growth in limiting light conditions: Flow effect. *AIChE J* 2002;48(5):1109–20.
- [130] Pruvost J, Legrand J, Legentilhomme P, Muller-Feuga A. Lagrangian trajectory model for turbulent swirling flow in an annular cell: Comparison with residence time distribution measurements. *Chem Eng Sci* 2002;57(7):1205–15.
- [131] Rosello Sastre R, Csögör Z, Perner-Nochta I, Fleck-Schneider P, Posten C. Scale-down of microalgae cultivations in tubular photo-bioreactors—A conceptual approach. *J Biotechnol* 2007;132(2):127–33.
- [132] Muller-Feuga A, Le Guédes R, Pruvost J. Benefits and limitations of modeling for optimization of *Porphyridium cruentum* cultures in an annular photobioreactor. *J Biotechnol* 2003;103(2):153–63.
- [133] Eilers PHC, Peeters JCH. A model for the relationship between light intensity and the rate of photosynthesis in phytoplankton. *Ecol Modell* 1988;42(3):199–215.
- [134] Podola B, Li T, Melkonian M. Porous substrate bioreactors: A paradigm shift in microalgal biotechnology? *Trends Biotechnol* 2017;35(2):121–32.