

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.02.008

## 有机碳源对小球衣藻生长和聚集的影响

贾伟<sup>1,2</sup>, 陈国炜<sup>1</sup>, 汪镠<sup>1</sup>, 吴雪菲<sup>1</sup>, 刘丽<sup>1</sup>

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 合肥市市政设计研究总院有限公司, 安徽 合肥 230041)

**摘要:**由于碳源作为主要营养物质对于微藻的培养过程有着重要影响,文章以小球衣藻(*Chlamydomonas microspiraera*)为研究对象,探究在葡萄糖和乙酸钠2种有机碳源影响下,微藻生长和聚集的变化。研究结果表明:一次性投加化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)为100 mg/L的乙酸钠时,菌藻细胞数量比为3:1的菌藻体系中有最大微藻聚集率63%,是纯藻对照组的2.2倍,是无碳源实验组的1.8倍;乙酸钠和葡萄糖对于微藻的聚集和生长均有促进作用,且乙酸钠促进效果优于葡萄糖,但是随着其投加量增加,促进微藻聚集和生长的效果下降,甚至出现抑制生长的情况;此外,相较于一次性投加碳源,分批式投加碳源更有利于微藻生长。

**关键词:**小球衣藻;菌藻互作;微藻聚集率;有机碳源

中图分类号:X172

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2026)02-0194-08

### Effect of organic carbon sources on growth and aggregation of *Chlamydomonas microspiraera*

JIA Wei<sup>1,2</sup>, CHEN Guowei<sup>1</sup>, WANG Ke<sup>1</sup>, WU Xuefei<sup>1</sup>, LIU Li<sup>1</sup>

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Hefei Municipal Design and Research Institute Co., Ltd., Hefei 230041, China)

**Abstract:** Considering the significant impact of carbon source as the main nutrient on the cultivation process of microalgae, this study focuses on *Chlamydomonas microspiraera* and explores the changes in microalgae growth and aggregation under the influence of two organic carbon sources, glucose and sodium acetate. Research has found that when sodium acetate with a chemical oxygen demand (COD) of 100 mg/L is added at once, the maximum microalgae aggregation rate is 63% in a bacterial-algal system with a ratio of bacteria to algae of 3:1, which is 2.2 times that of the pure algae control group and 1.8 times that of the carbon free control group. Both sodium acetate and glucose have a promoting effect on the aggregation and growth of microalgae, and sodium acetate has a better promoting effect than glucose. However, as the dosage increases, the effect of promoting microalgae aggregation and growth decreases, and even growth is inhibited. In addition, compared to one-time addition of carbon sources, batch addition of carbon sources is more conducive to the growth of microalgae.

**Key words:** *Chlamydomonas microspiraera*; bacterial-algal interaction; microalgae aggregation rate; organic carbon source

微藻作为一种潜在的生物质燃料和废水处理的材料,如何培养与收集是关键所在。微藻的生

长需求一般是光照、碳源、氮、磷等大量营养元素和一些微量元素,其中碳源作为其中营养物的主

收稿日期:2023-09-08;修回日期:2024-12-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(42277298)

作者简介:贾伟(1994—),男,安徽合肥人,合肥工业大学硕士生,合肥市市政设计研究总院有限公司工程师;

陈国炜(1976—),女,安徽无为,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者, E-mail: gwchen@hfut.edu.cn;

刘丽(1972—),女,安徽寿县人,博士,合肥工业大学教授,硕士生导师。

要成分对于微藻生长的影响是不可忽视的<sup>[1]</sup>。微藻可以通过光能自养和化能异养的方式获取自身所需营养物质,因此探求合理的混合培养方式是微藻规模化生产和利用的关键点<sup>[2-3]</sup>。

关于微藻的收集,传统的物理收集方法虽然比较经济,但一般只适合密度大的藻类<sup>[4]</sup>,且沉降的时间相对较长,效率较低,一般需要结合其他方法联合使用<sup>[5-6]</sup>;化学收集往往是通过投加絮凝剂絮凝沉降进行收集,不仅成本高,还会造成一定的污染<sup>[7]</sup>。在微藻培养过程中提高其聚集率将有助于后续微藻收集。

在自然界中,藻类在生长过程中会与细菌以多种方式共存<sup>[8]</sup>,两者之间存在着复杂的关系,如竞争、互利共生、共栖和寄生等<sup>[9-10]</sup>。大多数情况下,藻类会提供细菌所需营养物质,而细菌依附于藻,会分泌其生长所需的微量元素<sup>[11]</sup>。因此,本文将纯藻培养体系和菌藻培养体系相结合来观察乙酸钠和葡萄糖2种碳源对于微藻生长与聚集的影响,探究在2种碳源不同质量浓度下,纯藻体系和菌藻细胞数量比(下文简称“菌藻比”)为3:1的菌藻体系中微藻生长和聚集的情况,为微藻的规模化开发利用提供一定理论基础。

本文中有有机碳源质量浓度以化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)表示, COD值越大,代表有机碳源质量浓度越高。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 实验藻种

实验所用微藻为小球藻(*Chlamydomonas microspiraera*),编号FACHB-52,购自中国科学院野生生物种质库淡水藻种库(中国武汉)。小球藻培养于BDP-250二氧化碳人工气候培养箱(上海百典仪器设备有限公司)中,设置培养箱温度为(25±1)℃,光照强度为2000 lx,每日光照时间为12 h,接种后瓶口用已灭好菌的透气膜进行封口处理。微藻培养时每天定时摇动2~3次,使得藻细胞充分吸收利用培养基中的营养物质。小球藻的接种与培养均采用液体培养法,培养基采用SE培养基。

### 1.2 实验菌种

实验所用细菌取自合肥工业大学市政工程序批式活性污泥法反应器(sequencing batch reactor activated sludge process, SBR)中正在曝气阶段的活性污泥。取出1 mL活性污泥混合液,

接种到规格为500 mL的内装有250 mL灭菌LB肉汤的锥形瓶中,37℃恒温培养16 h后,从中取2份上清液各30 mL分别放入50 mL的离心管中,在Centrifuge 5804高速离心机(德国Eppendorf公司)中以5500g离心10 min后,弃去上清液,然后用培养液(121.43 mg/L NaNO<sub>3</sub>, 18 mg/L KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, 90 mg/L MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, 14 mg/L CaCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O, 1.25 mL/L微量元素溶液EDTA-Fe<sup>[12]</sup>, 1.25 mL/L微量元素溶液A<sub>5</sub><sup>[12]</sup>)将每个离心管的底物溶解定容到30 mL,重复上述操作2次后,各取1 mL分别稀释500倍、1250倍和2500倍,用测细胞活死的方法测试提取细菌的数量<sup>[13]</sup>。

### 1.3 实验设置

为了考察有机碳源对菌藻体系中微藻生长和聚集的影响,设置2组实验组和1组对照组,其中:实验组1考察在初始菌藻比为3:1时有机碳的质量浓度和种类对菌藻体系中微藻生长和聚集的影响;实验组2考察在初始菌藻比为3:1时有机碳分批式投加对菌藻体系中微藻生长和聚集的影响;对照组是纯藻体系组。培养时间0 d表示体系处于初始状态。

1) 实验组1。准备5个体积为500 mL的玻璃锥形瓶,向5个锥形瓶中各加入315 mL生长已经到达对数生长期的微藻( $9.0 \times 10^5$  个/mL),然后向瓶中各加入1 mL的细菌( $8.5 \times 10^8$  个/mL),保证初始的菌藻比为3:1,并将5个锥形瓶编号为1#~5#。向1#瓶中只加入35 mL培养液;向2#瓶中先加入7 mL用培养液配好的COD为5000 mg/L的乙酸钠,再加入28 mL培养液,使其中的乙酸钠COD为100 mg/L;向3#瓶中加入35 mL用培养液配好的COD为5000 mg/L的乙酸钠,使其中的乙酸钠COD为500 mg/L;向4#瓶中加入葡萄糖和培养液,采用与2#瓶相同的方法,使得4#瓶中葡萄糖COD为100 mg/L;向5#瓶中加入葡萄糖,采用与3#瓶相同的方法,使得5#瓶中葡萄糖COD为500 mg/L。

在光照培养箱中培养观察,光照培养箱条件与微藻培养条件一致。

2) 实验组2。在初始菌藻比3:1情况下,将COD为500 mg/L的乙酸钠和葡萄糖分成6次投加,投加时间间隔为1 d,其余条件均与实验组1完全相同。

3) 对照组。初始只投加纯藻,其余条件均与实验组1和实验组2相同。

## 1.4 分析方法

### 1.4.1 微藻聚集率的测定

从反应器中取 50  $\mu\text{L}$  样品于载玻片上,置于 BA410 生物显微镜(麦克奥迪实业集团有限公司)下观察拍摄,采用 Motic Images Plus 2.0 软件对微藻图像进行采集拍摄,并随机摄取 15 个视野进行图像分析,图像中 2 个及 2 个以上聚集在一起的微藻即判定为聚集体<sup>[14]</sup>,聚集率计算公式为:

$$C = \frac{A}{B} \times 100\% \quad (1)$$

其中:A 为视野中聚集的藻细胞数;B 为视野中藻细胞总数;C 为微藻聚集率。

### 1.4.2 SEM 观察

采用 SUPRA 40 场发射扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)(德国 Zeiss 公司)观察微藻聚集集体表面和内部结构。吸取适量微藻样品于 5 mm $\times$ 5 mm 硅片(苏州工业园区艾思科技有限公司)上,放入冰箱在 -4  $^{\circ}\text{C}$  下冷冻 4 h,然后放入 BT2KXL 真空冷冻干燥机(美国 VirTis 公司)冷干 8 h,冷干结束按如下步骤进行样品预处理,即固定—冲洗—脱水—置换—干燥—固定和喷金,最后将处理好的样品置于 SEM 下观察分析<sup>[15]</sup>。

### 1.4.3 微藻细胞数的测定

摇匀锥形瓶中样品后,取 4 mL 样品放入 5 mL 离心管中,在 8 000 r/min 下离心 10 min,然后弃去上清液,将剩余物重新悬浮在 4 mL 的 90% 丙酮溶液(中国医药集团有限公司)中,放入冰箱在 4  $^{\circ}\text{C}$  下避光保存 24 h,再以 5 500g 离心 10 min,将上清液收集后采用紫外分光光度法测定 630、645、663、750 nm 波长下的光密度(optical density, OD),以 90% 丙酮溶液作为空白对照,计算叶绿素 a 的质量浓度  $\rho$ ,公式<sup>[16]</sup>为:

$$\rho = [11.64(\text{OD}_{663} - \text{OD}_{750}) - 2.16(\text{OD}_{645} - \text{OD}_{750}) + 0.10(\text{OD}_{630} - \text{OD}_{750})]V \quad (2)$$

其中:V 为提取样品体积;OD 为  $\lambda$  波长处的光密度。

得到叶绿素 a 的质量浓度后,再通过标准曲线将叶绿素 a 的质量浓度换算成微藻的细胞数<sup>[16]</sup>。每组样品设置 3 个平行样,以便减小实验误差。

### 1.4.4 EPS 的提取与分析

采用改进的胞外聚合物(extracellular polymeric substances, EPS)提取方法分析菌藻 EPS 成分。从锥形瓶中取 4 mL 样品放入 5 mL 的离

心管中,先以 5 500g 离心 5 min 后,去除上清液,加入 4 mL 超纯水,然后 80  $^{\circ}\text{C}$  水浴加热 1 h,取出样品,再以 5 500g 离心 5 min 后,将上清液通过 0.22  $\mu\text{m}$  滤膜过滤,备测蛋白质和多糖<sup>[1]</sup>。多糖的测定采用硫酸-蒽酮法,在 620 nm 波长下使用 UV-2600 紫外分光光度计(尤尼柯(上海)仪器有限公司)测其吸光度<sup>[17-18]</sup>,以葡萄糖做标准物质绘制曲线,并计算其质量浓度。蛋白质的测定采用 Lowry 法,以牛血清白蛋白(bovine serum albumin, BSA)溶液做标准蛋白绘制标准曲线(全程避光),在 750 nm 波长下测定其吸光度,并根据标准曲线计算蛋白质的质量浓度<sup>[19]</sup>。每组样品设置 3 个平行样,以便减小实验误差。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 微藻生长情况分析

#### 2.1.1 不同有机碳源下体系中微藻生长情况

不同有机碳源情况下 2 种培养体系中微藻生长情况变化如图 1 所示。

从图 1a 可以看出:与无碳源组相比,在纯藻体系中投加 COD 为 100 mg/L 的乙酸钠和葡萄糖,对微藻生长都有一定的促进作用,且投加乙酸钠的效果比投加葡萄糖的效果好;100 mg/L 乙酸钠组有微藻细胞最大数量  $1.85 \times 10^6$  个/mL,其次是 100 mg/L 葡萄糖组( $1.78 \times 10^6$  个/mL),无碳源组最少( $1.64 \times 10^6$  个/mL)。

从图 1b 可以看出,在纯藻体系中投加 COD 为 500 mg/L 的乙酸钠和葡萄糖,葡萄糖组的微藻细胞最大数量为  $1.39 \times 10^6$  个/mL,而乙酸钠组和无碳源组的最大数量均为  $1.64 \times 10^6$  个/mL。这说明质量浓度过高的葡萄糖反而会对微藻生长起抑制作用。

从图 1c 可以看出:在初始菌藻比为 3 : 1 的菌藻体系中,与无碳源组相比,投加 COD 为 100 mg/L 的乙酸钠和葡萄糖,对微藻生长都有一定的促进作用,且投加乙酸钠的效果比投加葡萄糖的效果好;100 mg/L 乙酸钠组有微藻细胞最大数量  $1.69 \times 10^6$  个/mL,其次是葡萄糖组( $1.62 \times 10^6$  个/mL),无碳源组最少( $1.54 \times 10^6$  个/mL)。

从图 1d 可以看出:在初始菌藻比为 3 : 1 的菌藻体系中,投加 COD 为 500 mg/L 的乙酸钠对微藻生长有一定的促进作用;500 mg/L 乙酸钠组有微藻细胞最大数量  $1.64 \times 10^6$  个/mL,其次是无碳源组( $1.54 \times 10^6$  个/mL),葡萄糖组最少( $1.36 \times 10^6$  个/mL)。

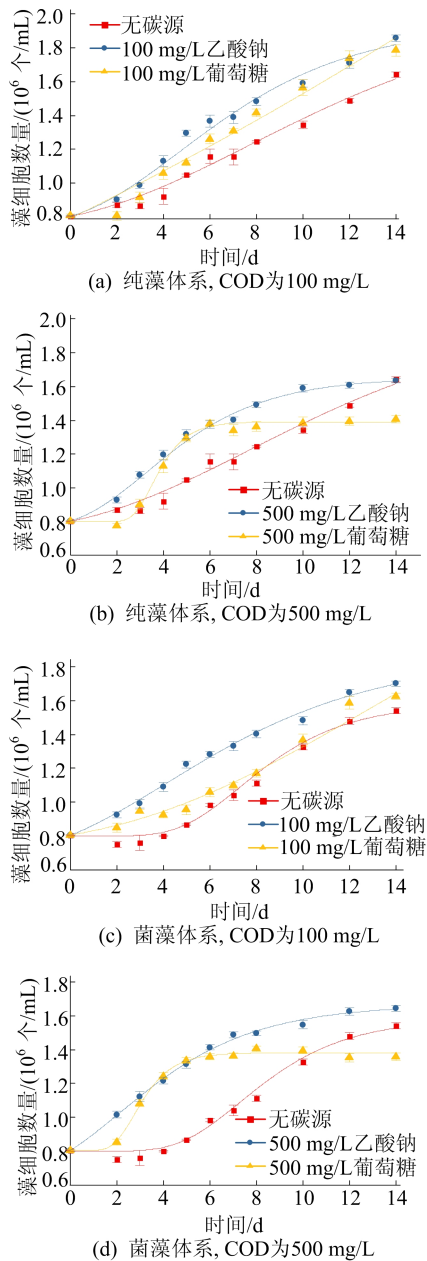


图 1 不同有机碳源情况下 2 种体系中微藻生长变化

2.1.2 不同碳源投加方式下微藻生长情况

不同碳源投加方式下 2 种培养体系中微藻生长变化如图 2 所示。从图 2 可以看出:在纯藻体系中,前 4 d 分批式投加乙酸钠的微藻细胞数量比一次性投加时略低,4 d 后分批式投加乙酸钠的微藻细胞数量比一次性投加时要高,说明乙酸钠对微藻生长具有促进作用,在 6 d,分批式投加乙酸钠有最高微藻细胞数量  $1.494 \times 10^6$  个/mL,一次性投加乙酸钠次之( $1.375 \times 10^6$  个/mL),无碳源组最低( $1.159 \times 10^6$  个/mL);在菌藻比为 3:1 的菌藻体系中,分批式投加乙酸钠的微藻细胞数量比一次性投加时低,在 6 d,一次性投加乙酸钠有最高微藻细胞数量  $1.413 \times 10^6$  个/mL,分

批式投加乙酸钠次之( $1.256 \times 10^6$  个/mL),无碳源组最低( $0.984 \times 10^6$  个/mL)。

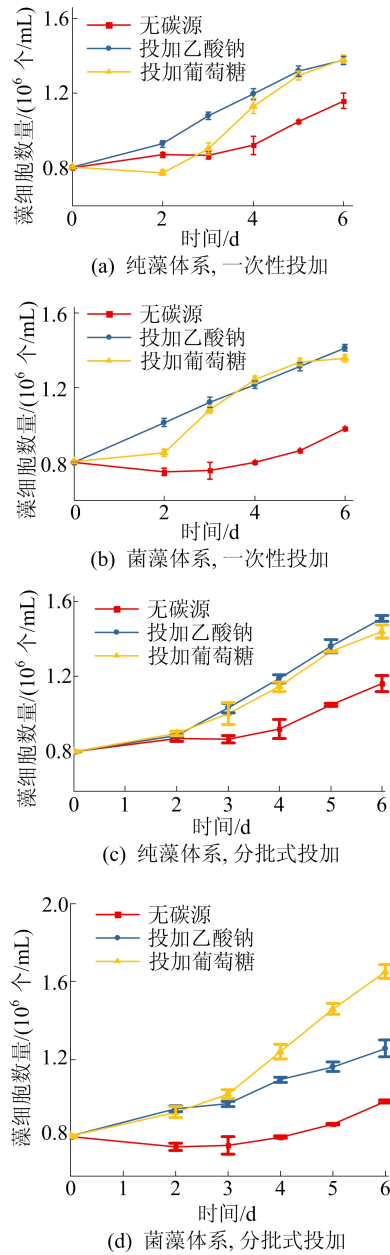


图 2 不同碳源投加方式下 2 种体系中微藻生长变化

乙酸钠的加入对培养液中的细菌具有筛选作用,一次性投加乙酸钠时,那些和微藻没有共生关系的细菌数量在总细菌数量中的占比会随着培养液中乙酸钠质量浓度的降低而降低<sup>[20]</sup>,而分批式投加乙酸钠时,那些和微藻没有共生关系的细菌数量的占比会随着培养液中乙酸钠质量浓度的降低而增加,从而微藻给细菌提供营养物质的压力增大,相对抑制了微藻的生长<sup>[21]</sup>。

由图 2 可知:在纯藻体系中,分批式投加葡萄糖的微藻细胞数量比一次性投加时要高,葡萄糖

可以促进微藻的生长,在 6 d,分批式投加与一次性投加的微藻细胞数量分别为  $1.428 \times 10^6$ 、 $1.382 \times 10^6$  个/mL,无碳源组最低;在菌藻比为 3:1 的菌藻体系中,总体来看,分批式投加葡萄糖的微藻细胞数量比一次性投加时要高,在 6 d,分批式投加与一次性投加的微藻细胞数量分别为  $1.652 \times 10^6$ 、 $1.357 \times 10^6$  个/mL,无碳源组最低。由于葡萄糖的加入,对培养液中的细菌具有筛选作用<sup>[22-23]</sup>,一次性投加葡萄糖时,会使得刚开始细菌的总数量较大,那些和微藻没有共生

关系的细菌数量占比会随着时间延长而越来越小,逐渐使得共生菌数量占比增大,从而促进微藻生长,而分批式投加葡萄糖时,那些和微藻没有共生关系的细菌数量占比会由于培养液中不断投加葡萄糖进行筛选后变得更小,从而微藻的生长会被更大促进。

## 2.2 微藻聚集率分析

### 2.2.1 显微镜与 SEM 观察分析

显微镜下微藻聚集图像和 SEM 图像如图 3 所示。

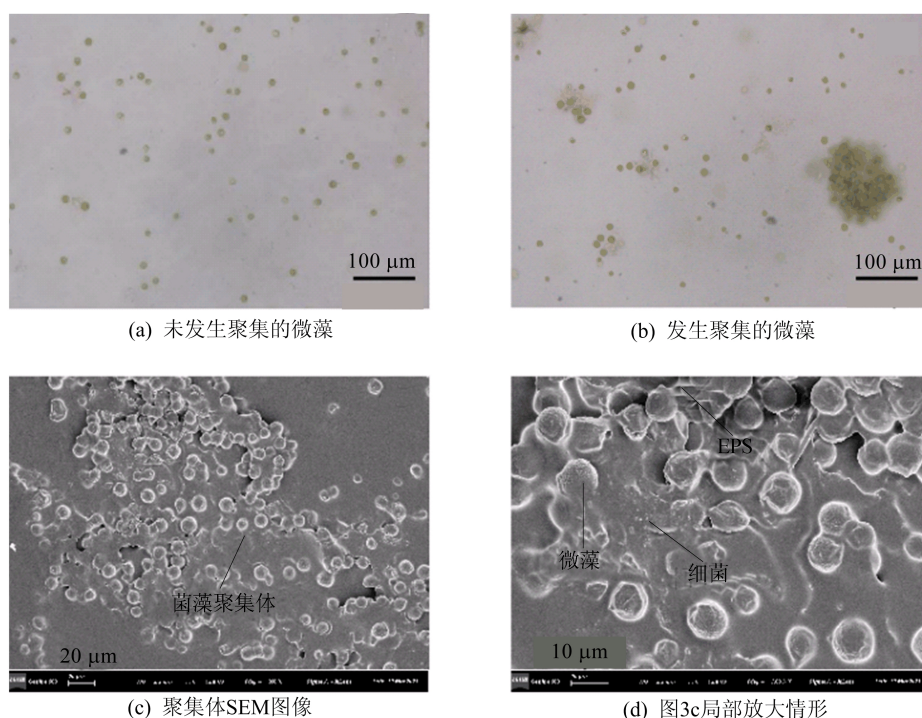


图 3 微藻显微镜下图像和 SEM 图像

从图 3a、图 3b 可以看出,未加入细菌的微藻大多处于分散状态,而加入细菌后出现微藻聚集体,其尺寸最大可超过  $100 \mu\text{m}$ ,说明加入细菌有利于微藻的聚集,并且聚集体越大,越有利于微藻的沉降和收集。从图 3c、图 3d 可以看出,聚集体的主体是由多个藻细胞结合在一起形成的,藻细胞周边分布着细菌,细胞之间则是 EPS 等黏着性物质。

### 2.2.2 不同质量浓度、碳源下的微藻聚集率

投加不同质量浓度、不同碳源情况下,2 种培养体系中微藻聚集率变化如图 4 所示。图 4 中:A 表示纯藻体系;BA 表示菌藻体系。

从图 4 可以看出,相较于纯藻体系,菌藻比 3:1 的菌藻体系中微藻聚集率明显更高,在投加 COD 为  $100 \text{ mg/L}$  的乙酸钠条件下,纯藻体系的

微藻聚集率仅有 29%,而菌藻体系中有最大微藻聚集率 63%,是前者的 2.2 倍。这是由于细菌分散游离在水中,初始加入的细菌量越大,细菌与微藻之间碰撞结合的几率越大,越容易碰撞在一起形成聚集体,从而促进微藻聚集<sup>[24-25]</sup>。

对比图 4a、图 4b 可知:纯藻体系中,投加 COD 为  $100 \text{ mg/L}$  的乙酸钠和葡萄糖条件下,微藻聚集率都有明显上升,其中乙酸钠促进微藻聚集的效果比葡萄糖好,在 6 d 有最大微藻聚集率 29%,而将 COD 调整为  $500 \text{ mg/L}$  时,微藻聚集率与 COD 为  $100 \text{ mg/L}$  时相似,依旧是乙酸钠促进微藻聚集的效果比葡萄糖好,在 6 d 有最大微藻聚集率 32%;在菌藻体系中,投加这 2 种碳源的效果与纯藻体系相似,都有促进作用,且乙酸钠的促进效果更好,在投加 COD 为  $100 \text{ mg/L}$  乙酸钠

钠条件下,在 6 d 有最大微藻聚集率 63%,在投加 COD 为 500 mg/L 时,其微藻聚集率为 62%。

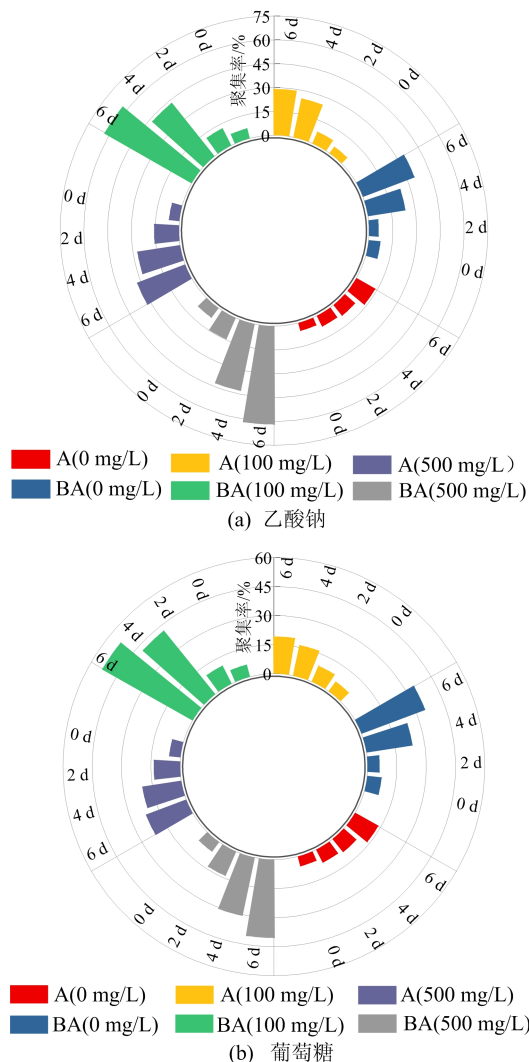


图 4 不同质量浓度、碳源情况下 2 种体系中微藻聚集率变化

### 2.2.3 不同碳源投加方式下的微藻聚集率分析

不同碳源投加方式下,2 种培养体系中微藻聚集率变化如图 5 所示。从图 5 可以看出:在纯藻体系中,一次性投加乙酸钠(A-D-S)的微藻聚集率比分批式投加乙酸钠(A-B-S)时略高,微藻聚集率在 6 d 达到最大,约为 32%;一次性投加葡萄糖(A-D-G)的微藻聚集率比分批式投加葡萄糖(A-B-G)时略高,微藻聚集率在 6 d 达到最大,约为 22%。

由图 5 可知:在菌藻比 3:1 的菌藻体系中,一次性投加乙酸钠(BA-D-S)和分批式投加乙酸钠(BA-B-S),前 2 d 的微藻聚集率无明显差异,在 4、6 d 一次性投加乙酸钠的微藻聚集率比分批式投加乙酸钠时略大,聚集率在 6 d 达到最高,此时微藻聚集率最高组为一次性投加乙酸钠组,约为

62%,而无碳源组仅为 35%左右,前者是后者的 1.8 倍;在一次性投加葡萄糖(BA-D-G)和分批式投加葡萄糖(BA-B-G)的条件下,前 2 d 的微藻聚集率无明显差异,在 4 d 分批式投加葡萄糖的微藻聚集率比一次性投加葡萄糖时略高,约为 32%,在 6 d 一次性投加葡萄糖的微藻聚集率比分批式投加葡萄糖时略大,微藻聚集率最高组为一次性投加葡萄糖组,约为 41%。

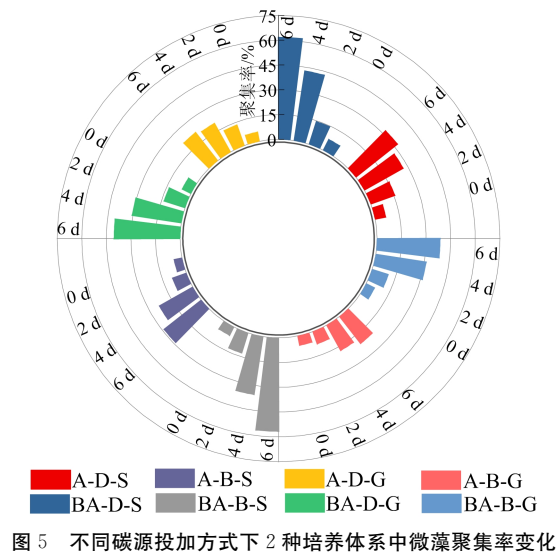


图 5 不同碳源投加方式下 2 种培养体系中微藻聚集率变化

## 2.3 EPS 分泌量分析

### 2.3.1 不同有机碳源情况下体系中 EPS 分泌量

不同质量浓度、不同碳源投加条件下,2 种培养体系中 EPS 分泌量变化如图 6 所示。图 6 中:S100、S500 分别表示投加 COD 为 100、500 mg/L 乙酸钠(sodium);G100、G500 分别表示投加 COD 为 100、500 mg/L 葡萄糖(glucose)。从图 6 可以看出,各组的初始蛋白质分泌量约为 30 mg/L,多糖分泌量约为 11 mg/L。在无碳源时,各组蛋白质分泌量都随着时间延长而增加,在 8 d 各组蛋白质分泌量达到最高,纯藻体系和菌藻比 3:1 的菌藻体系分别为 44、40 mg/L;纯藻体系中蛋白质分泌量明显高于菌藻体系;在投加 COD 为 100、500 mg/L 的乙酸钠条件下,菌藻体系中 EPS 分泌量均低于纯藻体系;但是在投加 COD 为 500 mg/L 的葡萄糖作为碳源的情况下,前 6 d 纯藻体系 EPS 分泌量低于菌藻体系,在 6、8 d 纯藻体系 EPS 分泌量更高,这可能是由于在营养缺乏的条件下,细菌生存可能要利用 EPS 作为营养。

在同一培养体系下,相较于乙酸钠,投加相同质量浓度葡萄糖组蛋白质分泌量更高;在纯藻体系和菌藻体系中投加相同质量浓度的乙酸钠和葡

葡萄糖, 乙酸钠组多糖分泌量略高于葡萄糖组。

纯藻体系中, 随着碳源质量浓度增加, 蛋白质分泌量相对变低; 菌藻体系中, 随着碳源质量浓度增加, 蛋白质和多糖分泌量增加。

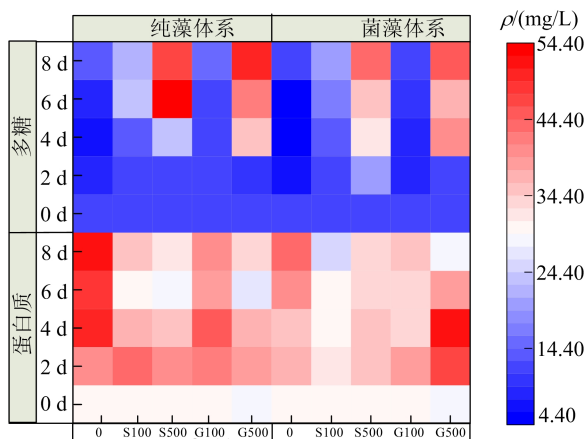


图 6 投加不同质量浓度、碳源下 2 种体系中 EPS 分泌量变化

### 2.3.2 不同碳源投加方式下体系中 EPS 分泌量

不同碳源投加方式下, 2 种培养体系中 EPS 分泌量变化如图 7 所示。图 7 中: 中间为分批式投加碳源组情形; 两侧为一次性投加碳源组情形。

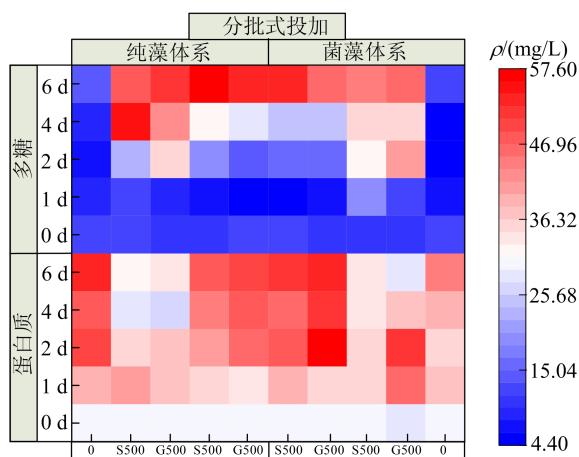


图 7 不同碳源投加方式下 2 种体系中 EPS 分泌量变化

从图 7 可以看出: 在投加乙酸钠作为外加碳源时, 纯藻体系中, 1 d 时一次性投加组蛋白质分泌量最高 (45 mg/L), 多糖分泌量各组无明显差异, 2 d 时各组蛋白质分泌量无明显差异, 分批式投加组多糖分泌量最高 (20 mg/L), 在 4、6 d 分批式投加组 EPS 分泌量略高于一次性投加组; 在菌藻比 3:1 的菌藻体系中, 1 d 时一次性投加组蛋白质分泌量最高 (约为 47 mg/L), 1 d 后分批式投加组最高, 6 d 时分批式投加组多糖分泌量最高 (52 mg/L)。

在葡萄糖作为外加碳源时, 纯藻体系中, 蛋白质分泌量 1 d 时各组无明显差异, 2 d 时分批式投加组最高 (46 mg/L), 在 4、6 d 一次性投加组最少, 而多糖分泌量在前 2 d 无明显差异, 4 d 时一次性投加组略高于分批式投加组, 6 d 时分批式投加组略高于一次性投加组; 在菌藻体系中, 蛋白质分泌量 1 d 时一次性投加组最高, 其次是分批式投加组, 4 d 时一次性投加组略高于分批式投加组, 无碳源组最少, 6 d 时分批式投加组 (46 mg/L) 略高于一次性投加组。

## 3 结 论

1) 相较于纯藻体系, 菌藻共培养体系更有利于微藻聚集。

2) 投加乙酸钠和葡萄糖对于微藻聚集均有促进作用, 且乙酸钠的效果优于葡萄糖; 当碳源质量浓度升高, 纯藻体系中微藻聚集率无明显变化, 菌藻体系中微藻聚集率有微量下降; 相较于分批式投加碳源, 一次性投加碳源促进微藻聚集的效果更好。一次性投加 COD 为 100 mg/L 的乙酸钠时, 菌藻体系中有最大微藻聚集率 63%, 是纯藻对照组的 2.2 倍, 是无碳源实验组的 1.8 倍。

3) 投加乙酸钠和葡萄糖对于微藻生长均有促进作用, 且乙酸钠的效果优于葡萄糖; 但是随着 2 种碳源质量浓度上升, 促进作用减弱, 甚至出现抑制生长的趋势; 纯藻体系中微藻细胞数量要高于菌藻体系; 分批式和一次性投加碳源对纯藻体系中微藻细胞数量无明显影响, 菌藻体系中, 相较于一次性投加葡萄糖, 分批式投加葡萄糖明显促进微藻生长。

4) 分批式投加碳源的培养体系中 EPS 分泌量要明显高于一次性投加碳源的培养体系; 有机碳源质量浓度低时, 菌藻体系中 EPS 分泌量要低于纯藻体系, 但是当培养液中有有机碳源质量浓度高时, 菌藻体系中 EPS 分泌量要高于纯藻体系; 乙酸钠作为碳源能够促进培养体系中多糖的分泌; 多糖是形成菌藻聚集体的一个重要原因。

## [参 考 文 献]

- [1] HE Q L, CHEN L, ZHANG S J, et al. Natural sunlight induced rapid formation of water-born algal-bacterial granules in an aerobic bacterial granular photo-sequencing batch reactor [J]. Journal of Hazardous Materials, 2018, 359: 222-230.
- [2] WANG J H, YANG H Z, WANG F. Mixotrophic cultiva-

- tion of microalgae for biodiesel production; status and prospects[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2014, 172:3307-3329.
- [3] CANDIDO C, LOMBARDI A T. Mixotrophy in green microalgae grown on an organic and nutrient rich waste[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2020, 36:20.
- [4] VANDAMME D, FOUBERT I, MUYLEAERT K. Flocculation as a low-cost method for harvesting microalgae for bulk biomass production [J]. Trends in Biotechnology, 2013, 31(4):233-239.
- [5] HENDERSON R, PARSONS S A, JEFFERSON B. The impact of algal properties and pre-oxidation on solid-liquid separation of algae[J]. Water Research, 2008, 42:1827-1845.
- [6] PANDEY A, PATHAK V V, KOTHARI R, et al. Experimental studies on zeta potential of flocculants for harvesting of algae[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 231:562-569.
- [7] BEN-AMOTZ A, SHAISH A, AVRON M. The biotechnology of cultivating *Dunaliella* for production of  $\beta$ -carotene rich algae[J]. Bioresource Technology, 1991, 38:233-235.
- [8] FALLAHI A, REZVANI F, ASGHARNEJAD H, et al. Interactions of microalgae-bacteria consortia for nutrient removal from wastewater: a review[J]. Chemosphere, 2021, 272:129878.
- [9] GENG H F, BELAS R. Molecular mechanisms underlying roseobacter-phytoplankton symbioses [J]. Current Opinion in Biotechnology, 2010, 21(3):332-338.
- [10] WANG S F, LIU J X, LI C, et al. Efficiency of *Nannochloropsis oculata* and *Bacillus polymyxa* symbiotic composite at ammonium and phosphate removal from synthetic wastewater[J]. Environmental Technology, 2019, 40(19):2494-2503.
- [11] LUTZU G A, DUNFORD N T. Interactions of microalgae and other microorganisms for enhanced production of high-value compounds[J]. Frontiers in Bioscience; a Journal and Virtual Library, 2018, 23:1487-1504.
- [12] 施华升. 菌藻共生关系对水环境中单细胞微藻聚集行为的影响[D]. 合肥:合肥工业大学, 2019.
- [13] BOULOS L, PREVOST M, BARBEAU B, et al. LIVE/DEAD<sup>®</sup> BacLight<sup>™</sup>: application of a new rapid staining method for direct enumeration of viable and total bacteria in drinking water[J]. Journal of Microbiological Methods, 1999, 37(1):77-86.
- [14] CHEN G W, ZHU N, TANG Z B, et al. Resource availability shapes microbial motility and mediates early-stage formation of microbial clusters in biological wastewater treatment processes[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2014, 98:1459-1467.
- [15] CHEN X H, ZHANG C, TAN L J, et al. Toxicity of Co nanoparticles on three species of marine microalgae[J]. Environmental Pollution, 2018, 236:454-461.
- [16] JI X Y, JIANG M Q, ZHANG J B, et al. The interactions of algae-bacteria symbiotic system and its effects on nutrients removal from synthetic wastewater [J]. Bioresource Technology, 2018, 247:44-50.
- [17] WILÉN B M, JIN B, LANT P. The influence of key chemical constituents in activated sludge on surface and flocculating properties[J]. Water Research, 2003, 37:2127-2139.
- [18] LI X Y, YANG S F. Influence of loosely bound extracellular polymeric substances (EPS) on the flocculation, sedimentation and dewaterability of activated sludge[J]. Water Research, 2007, 41:1022-1030.
- [19] SUN L, TIAN Y, ZHANG J, et al. A novel membrane bioreactor inoculated with symbiotic sludge bacteria and algae: performance and microbial community analysis [J]. Bioresource Technology, 2018, 251:311-319.
- [20] KIM S, PARK J, CHO Y B, et al. Growth rate, organic carbon and nutrient removal rates of *Chlorella sorokiniana* in autotrophic, heterotrophic and mixotrophic conditions [J]. Bioresource Technology, 2013, 144:8-13.
- [21] OLIVEIRA C Y B, D'ALESSANDRO E B, FILHO N R A, et al. Synergistic effect of growth conditions and organic carbon sources for improving biomass production and biodiesel quality by the microalga *Choricystis minor* var. *minor* [J]. Science of the Total Environment, 2021, 759:143476.
- [22] MARTÍNEZ F, ORÚS M I. Interactions between glucose and inorganic carbon metabolism in *Chlorella vulgaris* strain UAM 101 [J]. Plant Physiology, 1991, 95:1150-1155.
- [23] LI Z, MA H, HONG Z C, et al. Phytoplankton interspecific interactions modified by symbiotic fungi and bacterial metabolites under environmentally relevant hydrogen peroxide concentrations stress [J]. Water Research, 2023, 246:120739.
- [24] OGBONNA J C, YOSHIZAWA H, TANAKA H. Treatment of high strength organic wastewater by a mixed culture of photosynthetic microorganisms [J]. Journal of Applied Phycology, 2000, 12:277-284.
- [25] STAATS N, STAL L J, MUR L R. Exopolysaccharide production by the epipellic diatom *Cylindrotheca closterium*: effects of nutrient conditions [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2000, 249(1):13-27.

(责任编辑 张淑艳)