



专论与综述

## 微藻采收技术的研究进展

才金玲<sup>\*1</sup> 冯辰辰<sup>1</sup> 倪国倩<sup>1</sup> 何丹<sup>1</sup> 李晓婷<sup>1</sup> 唐娜<sup>1</sup> 王广策<sup>2</sup>

1 天津科技大学化工与材料学院 天津市卤水化工与资源生态化利用重点实验室 天津 300457

2 中国科学院海洋研究所实验海洋生物学重点实验室 山东 青岛 266071

**摘要:** 微藻作为一种有巨大应用前景的生物资源,在环境保护、废水处理和清洁能源等领域广泛应用。但是微藻采收成本过高严重限制了微藻产业的发展,因此,寻找一种经济、环保、高效的采收技术对促进微藻产业的发展具有十分重要的意义。本文分析了常用微藻采收技术的优缺点,包括离心分离、沉降、过滤、浮选和絮凝技术,重点论述絮凝技术在微藻采收方面的研究进展,以期微藻高效、低成本采收方案的选择及其研究方向提供参考。

**关键词:** 微藻,采收,絮凝,生物絮凝

## Progress in microalgae harvesting technology

CAI Jin-Ling<sup>\*1</sup> FENG Chen-Chen<sup>1</sup> NI Guo-Qian<sup>1</sup> HE Dan<sup>1</sup> LI Xiao-Ting<sup>1</sup>  
TANG Na<sup>1</sup> WANG Guang-Ce<sup>2</sup>

1 College of Chemical Engineering and Materials Science, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin Key Laboratory of Brine Chemical Engineering and Resource and Eco-utilization, Tianjin 300457, China

2 Key Laboratory of Experimental Marine Biology, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, Shandong 266071, China

**Abstract:** Microalgae are promising biological resource, which will play important role in environmental protection, wastewater treatment and clean energy production. However, the high-cost of the harvesting process limits its large-scale application. Thus, it is quite important to find economical, environment-friendly, and efficient microalgae harvest technologies. This paper reviewed the advantage and disadvantage of different microalgae harvesting methods, including centrifugation, sedimentation, filtration, flotation, and flocculation technology. This paper focus on research progress about flocculation technology. The main aim is hoping to provide some theoretical and technological support for economic, environment-friendly, efficient harvesting technologies to promote the microalgae industry.

**Keywords:** Microalgae, Harvesting, Flocculation, Biological flocculation

**Foundation items:** Tianjin Natural Science Foundation (17JCYBJC22900); Student Laboratory Innovation Fund of Tianjin University of Science and Technology (1803A203); Tianjin University Students' Innovative Training Program (201910057148)

**\*Corresponding author:** E-mail: jinlingcai@tust.edu.cn

**Received:** 28-10-2019; **Accepted:** 11-02-2020; **Published online:** 21-05-2020

**基金项目:** 天津市科学基金面上项目(17JCYBJC22900); 天津科技大学大学生实验室创新基金(1803A203); 天津市高等学校大学生创新训练计划(201910057148)

**\*通信作者:** E-mail: jinlingcai@tust.edu.cn

**收稿日期:** 2019-10-28; **接受日期:** 2020-02-11; **网络首发日期:** 2020-05-21

微藻是地球上生长速度最快的光合微生物之一,在各种生态环境中广泛分布,例如淡水、海洋、雪地、平原和温泉等。微藻可以通过光合作用消耗  $\text{CO}_2$ ,同时将光能转变为化学能并释放氧气,在保护环境、减缓温室效应领域发挥着重要的作用。微藻细胞内积累脂质、蛋白质,并产生一些高价值的化学产品,如二十二碳六烯酸(docosahexaenoic acid, DHA)、二十碳五烯酸(eicosapentaenoic acid, EPA)和色素等,这些物质在营养保健和化妆品行业广泛应用<sup>[1-2]</sup>;此外,化石燃料的过度使用导致环境恶化、水体污染等问题日益突出,开发微藻基清洁能源(如氢气、生物柴油、甲烷等),以及利用微藻处理污水是当前的研究热点<sup>[2-3]</sup>。

虽然微藻具有很高的利用价值,但采收成本过高是限制微藻应用和产业快速发展的重要瓶颈之一<sup>[1]</sup>。由于微藻细胞体积微小(3–30  $\mu\text{m}$ ),培养液中培养密度比较低(开放池一般<0.6 g/L,光反应器一般<3 g/L),藻细胞表面带有负电荷(–7.5–40 mV)等特性,导致微藻细胞一般稳定悬浮于培养液中,采收难度加大,增加了采收成本<sup>[4]</sup>。分析估算表明采收环节的成本约占整个微藻生产成本的 20%–30%<sup>[5]</sup>。因此,寻找一种低成本、高效率的采收技术对于促进微藻产业的快速发展至关重要。本文对近年来报道的微藻采收技术进行总结,着重介绍了絮凝技术在微藻采收方面的研究进展,期望能对降低采收成本和促进微藻产业的快速发展提供一定的理论基础和技术支持。

## 1 微藻采收技术简介

目前,微藻采收主要使用的技术包括离心分离、过滤、沉降、浮选和絮凝<sup>[6]</sup>。下面分别针对不同采收技术进行介绍。

### 1.1 离心分离技术

离心技术(centrifugation)是利用离心机高速旋转时产生的强大离心力使微藻与培养液发生分

离,进而对微藻进行采收的一种技术,是目前应用范围最为广泛的微藻采收技术之一。

离心一般可获得较高的采收率,通常高于 95%。微藻细胞的大小、密度、沉降特性、离心液体积、离心力大小和离心时间都会对采收效率产生影响<sup>[7]</sup>。Heasman 等<sup>[7]</sup>通过离心分离技术对 9 种微藻(*P. lutheri*, *Isochrysis* sp., *C. calcitrans*, *S. costatum*, *T. pseudonana*, *P. tricornutum*, *C. muelleri*, *T. chui*, *N. oculata*)进行了采收实验,在离心力 13 000、6 000 和 1 300 $\times g$  条件下,9 种微藻的采收效率分别在 95%–100%、46%–79% 和 5%–66% 之间。张剑桥等<sup>[8]</sup>使用 28 000 r/min 的转速和 0.82 L/min 的进水速率对城市污水中培养的微藻(浓度 1.2 g/L 和 pH 7.0)进行离心分离采收,采收速率为 0.76 g/min,采收效率为 84.1%,浓缩倍数高达 337.1 倍。

利用离心分离技术采收微藻具有操作简单、效率高、无任何添加剂、应用范围广等优点<sup>[9]</sup>,特别适合用于食品微藻的采收。但在大规模使用该技术时,存在能耗高、设备运行和维护成本投入大等问题,这无疑加重了企业的运行成本,因此该技术更适合于微藻高附加值产品的研究和应用。

### 1.2 过滤技术

过滤(filtration)是一种常见的固液分离技术。在微藻采收过程中利用重力、压力和真空力等的作用使培养液通过滤膜进入到膜的另一侧,而微藻细胞则被过滤膜截留下来集中在一起,从而实现采收微藻的目的。

根据溶液特点、动力学条件和过滤膜特点的不同,过滤可以分为微滤(microfiltration, 0.1–10  $\mu\text{m}$ )、粗滤(smacrofiltration, 10  $\mu\text{m}$ )、死端过滤(dead end filtration)、超滤(ultrafiltration, 0.02–0.2  $\mu\text{m}$ )、切面流超滤(tangential flow filtration)、真空过滤(vacuum filtration)和压力过滤(pressure filtration)。常用的膜材料包括聚偏氯乙烯

(polyvinylidene chloride, PVDF)、聚丙烯腈(polyacrylonitrile, PAN)、聚醚砜(polyethersulfone, PES)、聚四氟乙烯(polytetrafluoroethylene, PTFE)、聚醚砜-聚乙烯吡咯烷酮(polyethersulfone polyvinyl-pyrrolidone, PES-PVP)<sup>[10]</sup>。膜表面的带电性会直接影响微藻的过滤效果,膜表面带正电性的过滤效果远远低于中性电荷的膜<sup>[11]</sup>。

微藻细胞的体积大小和细胞外分泌物是影响过滤效率的主要因素,直接影响滤膜的选择和过滤工艺。对细胞体积较大的微藻,过滤技术采收效率高,如螺旋藻(*Spirulina* sp.)、空心藻(*Coelastrum* sp.);而细胞体积较小的微藻,如小球藻(*Chlorella* sp.)、微拟球藻(*Nannochloropsis* sp.)则容易在过滤过程中发生堵塞过滤膜的现象,导致过滤效率下降<sup>[12]</sup>。在微藻培养过程中细胞碎片和细胞外分泌物(如多糖、蛋白质类等物质)也会堵塞滤膜,严重影响过滤效果<sup>[13]</sup>。吴晓甜等<sup>[14]</sup>采用孔径 100 nm 的陶瓷膜在次临界通量条件下,多周期过滤能够有效收获小球藻。98%的进水藻细胞以滤饼方式被截留,通过清洗膜表面能够获得高浓度藻液,浓缩因子高于 34。张克峰等<sup>[15]</sup>在砂滤池表面增加 10 cm 无烟煤,可有效提高滤池过滤性能,大大减少由于传统砂滤池表层易被堵塞,延长过滤周期,从而高效过滤微藻,而且滤前投加次氯酸钠也使过滤周期显著延长。

过滤过程中不需要添加任何化学试剂就能高效回收微藻。因此过滤技术不会引入有毒有害物质,是一种天然的方法。但过滤膜受外界和培养液环境的影响较大,容易出现膜污染的问题,需要不定时地更换或者清洗过滤膜,这些问题无疑增加了采收成本,制约了过滤技术的进一步推广和应用。

### 1.3 沉降技术

沉降(sediment)是利用重力作用对微藻进行沉降采收的一种技术。微藻细胞密度<sup>[16]</sup>和细胞大小<sup>[17]</sup>对沉降效率有显著的影响。沉降技术更适用

于收集细胞密度较大的微藻,如硅藻(*Melosira* sp.),而细胞密度较小的微藻如铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)一般不适宜沉降技术采收。许多环境因素都会影响微藻沉降,例如温度和微藻生活习惯等<sup>[16,18-19]</sup>。

由于沉降技术存在效率低、耗时长等问题,因而在实际生产中,沉降技术一般会与絮凝、超声波、离心等技术结合使用,以减少沉降时间,提高效率<sup>[9,20]</sup>。

### 1.4 气浮技术

气浮技术(air flotation)是利用微气泡作为载体(气泡直径<0.1 mm),将产生的大量微小气泡附着在微藻细胞的表面,利用气泡作为载体降低细胞密度,然后将微藻细胞运送到液体表面,在液体表面对微藻进行富集采收的一种技术<sup>[1]</sup>。根据气泡形成不同,气浮技术分为泡沫气浮、压力溶气浮选和电解气浮等<sup>[21]</sup>。

泡沫气浮是向溶液中鼓入气泡,将微藻细胞吸附在气泡上面并随着气泡浮到水面,从而实现微藻采收。泡沫浮选不需要额外加压,因此能耗相对较低,是微藻浮选研究的一项热门技术。但大多数时候气泡和微藻都会带负电,在自然情况下很难与气泡结合形成有效浮选。因此,在气浮过程中需要添加起泡剂和浮选剂改变颗粒表面疏水性,增加颗粒的气浮性能,使颗粒直接与气泡机密结合,从而增加微藻采收率。然而这些药剂的添加会对微藻的生长产生不良影响,并对下游工艺造成污染<sup>[22]</sup>。张海阳等<sup>[23]</sup>通过添加十二胺作为捕收剂,利用气浮技术采收小球藻,在最适捕收剂用量、搅拌转速、藻液浓度、溶液 pH 和浮选时间条件下,采收率高达 98.35%。Garg 等<sup>[24]</sup>添加十二烷基吡啶(dodecyl pyridinium chloride, DPC)作为表面活性剂,利用气浮技术对海洋微藻(*Tetraselmis* sp. M8)进行了分离采收实验,收集的海洋微藻(*Tetraselmis* sp. M8)最终浓度增加了 23 倍,采收效率可以达到 99%以上。Wang 等<sup>[25]</sup>

利用分散空气浮选法采收含藻废水,回收率为96.5%,并通过技术改进有效去除起泡剂和浮选剂。

压力溶气气浮是使空气在一定的压力下溶于水呈饱和状态,然后使水压力骤降,利用改变压力的方式产生微气泡(一般为20–100  $\mu\text{m}$ )的工艺,能很好地满足气浮要求。与泡沫浮选相比,溶气气浮减少了浮选药剂的添加,减少了对下游微藻产品的污染。压力溶气气浮的应用目前更为普遍,对藻液的来源也没有要求,无论是营养液还是富营养化的废水培养均可。但由于增压步骤在一定程度上增加了能耗,该方法的能耗较高且需要加压设备,操作较为复杂<sup>[26]</sup>。李秀辰等<sup>[27]</sup>采用压力溶气气浮技术对两种小球藻和一种金藻进行了采收,发现多种因素如微藻液位高度、藻液流量、溶气压力或气体流量均对微藻的采收产生影响,优化采收条件后,两种小球藻和一种金藻的采收率分别为60.3%、68.1%和65.4%。Nguyen等<sup>[28]</sup>利用压力溶气气浮法采收江水中的蓝藻和绿藻,在1.5 kg(f)/cm<sup>2</sup>压力下叶绿素a的去除率达到99%。

电解气浮是通过添加直流电,分别在阴极和阳极电解出氢气和氧气的微小气泡,微藻附着在气泡上从而达到采收微藻的目的。电解气浮主要包括以下步骤:首先反应性阳极溶解产生絮凝剂;然后这些絮凝剂与微藻细胞相互作用,使细胞失稳;接下来,不稳定的细胞结合形成絮状絮凝物,最终在阴极上形成气泡,与絮体结合漂浮至溶液表面<sup>[29]</sup>。电解气浮产生的气泡粒径非常小(其粒径在22–50  $\mu\text{m}$ ),而且密度也小,因此电解气泡截获微藻细胞的能力较高<sup>[30]</sup>;另外,电解气浮受溶液pH值影响小(适用于pH 4.0–10.0的溶液)<sup>[31]</sup>。但电解气浮不适用于采收海水藻,易在阳极表面形成氧化膜,影响采收效率,仍处于实验室研究阶段<sup>[29]</sup>。

由于微藻细胞与气泡之间的粘附并不牢靠,

易受水流环境的剪切而脱附,进而影响采收效率。上述气浮技术均存在弊端,阻碍其产业化<sup>[1]</sup>。因此,急需改进气浮技术。

虽然上文描述的几种采收技术都凭借各自的优势和特点在微藻产业生产中得到了应用,并取得了一定的效果,然而这几种采收技术的缺点和应用范围也使其在微藻采收环节难以发挥更大的作用。因此,为促进微藻产业的快速发展,寻找一种经济、环保、高效的采收技术仍然具有十分重要的意义。

## 2 絮凝技术采收微藻

絮凝(flocculation)采收微藻主要是通过电荷中和、架桥、网捕作用将微藻细胞聚集在一起,然后通过固液分离进而完成微藻采收目的。絮凝微藻具有较高的经济性和采收效率,并能显著降低能耗。因此絮凝技术是目前微藻采收最常用的方法之一。目前常用的絮凝方法主要包括化学絮凝、物理絮凝和生物絮凝三大类<sup>[32–33]</sup>。

### 2.1 化学絮凝

无机化学絮凝是向培养液中加入相应的化学物质,通过电荷中和、架桥作用使培养液中分散悬浮的微藻细胞聚集成团,加快其沉降速度,从而实现对微藻细胞的絮凝采收。根据絮凝剂的不同,化学絮凝可以分为两大类:无机絮凝和高分子絮凝。

#### 2.1.1 无机絮凝

金属离子(如 $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 等)可以中和微藻细胞表面的负电荷,消除微藻细胞间的静电斥力,加速微藻细胞之间的聚集,最终达到絮凝沉降的效果。因此,金属离子经常用于微藻的絮凝采收。当微藻培养液呈碱性时,这些金属离子还能形成相应的氢氧化物难溶物,如 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 、 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 和 $\text{Mg}(\text{OH})_3$ ,通过网捕沉淀作用加快微藻的絮凝沉降。

郭婷婷等<sup>[34]</sup>使用 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 、 $\text{NH}_4\text{Al}(\text{SO}_4)_2$ 、 $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2$ 、 $\text{MgSO}_4$ 、 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 、 $\text{FeCl}_3$ 这6种无

机絮凝剂对布朗葡萄藻(*Botryococcus braunii*)进行了絮凝实验,发现 6 种絮凝剂对布朗葡萄藻(*Botryococcus braunii*)均有絮凝作用,其中  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 、 $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2$  和  $\text{FeCl}_3$  这 3 种絮凝剂在浓度分别为 1.1、0.45、0.9 g/L 时絮凝效率最高,分别为 91.2%、93.5%、88.0%。赵奎等<sup>[35]</sup>使用  $\text{FeCl}_3$ 、 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 、 $\text{AlCl}_3$ 、 $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2$ 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 $\text{NaOH}$ 、聚丙烯酰胺和壳聚糖 8 种絮凝剂对埃氏小球藻(*Chlorella emersonii*)进行了絮凝实验,其中  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 、白矾、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 $\text{NaOH}$  在浓度分别为 0.3、0.7、0.5、0.9 g/L 及静置沉降时间为 80 min 的实验条件下,埃氏小球藻(*Chlorella emersonii*)的絮凝效率均可以达到 90% 以上。

$\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$  等金属盐在培养液中还可以形成聚铁、聚铝等聚合物,如聚合硫酸铁<sup>[36]</sup>、聚合氯化铝<sup>[37]</sup>、聚合氢氧化铁和聚合氢氧化铝等。以吸附架桥形式絮凝微藻细胞,加快其沉降速度,实现快速采收的目的<sup>[38]</sup>。彭超等<sup>[36]</sup>利用 1.5 g/L 聚合硫酸铁絮凝雨生红球藻(*Haematococcus pluvialis*) 120 min 时的絮凝效率可以达到 90%。Wu 等<sup>[37]</sup>发现 4 种浓度(300、500、700 和 900 mg/L)聚合氯化铝均能高效絮凝一种海洋微藻——球等鞭金藻(*Isochrysis galbana*),絮凝效率均在 98.2% 以上。

无机絮凝技术具有操作过程简单、絮凝效率高、应用范围广等优点。但在絮凝过程中由于引入了金属离子,如果处理不当,可能会对培养微藻的水体和收集的微藻造成污染,不利于环境保护和后续微藻产品的加工生产,因此该技术的推广使用受到了限制。

### 2.1.2 高分子絮凝

高分子絮凝的工作机理是高分子的吸附架桥、网捕等作用实现微藻细胞的聚焦成团<sup>[32]</sup>。常用的高分子絮凝剂主要包括壳聚糖(chitosan)、阳离子淀粉(cationic starch)<sup>[39]</sup>、菊粉(inulin)<sup>[40]</sup>、二烯丙基二甲基氯化铵(diallyldimethylammonium chloride, DADMAC)、次乙二胺(ethyleneimine)、聚乙烯亚胺(polyethyleneimine polymers, PED)和

乙烯胺(vinylamine)等。

Rashid 等<sup>[41]</sup>利用壳聚糖絮凝采收小球藻,在 2–3 min 内小球藻的絮凝效率便可以达到 90% 以上,但培养液的 pH 会影响壳聚糖的絮凝效率。冯闪闪等<sup>[42]</sup>利用制备的阳离子淀粉对野生蓝藻的絮凝效率可以达到 90% 以上,并且培养液 pH 在 5.0–9.0 的范围内对阳离子淀粉的絮凝效率无任何影响。

壳聚糖和阳离子淀粉作为新型的天然高分子絮凝剂,具有安全环保、可生物降解、无污染、使用剂量小等优点。但因为生产成本低,导致目前难以代替传统的高分子絮凝剂大规模使用。目前大量的研究集中在优化壳聚糖<sup>[43]</sup>和阳离子淀粉<sup>[44]</sup>的生产条件上,以期降低生产成本,适用于大规模使用。

## 2.2 物理絮凝技术

物理絮凝主要包括电絮凝和磁絮凝。与化学絮凝相比,物理絮凝在一定程度上可以避免化学絮凝剂产生的污染问题,更能促进微藻产业的可持续健康发展。

### 2.2.1 电絮凝

电絮凝(electrocoagulation)是利用阳极电解氧化释放的金属离子中和微藻细胞表面的负电荷,破坏微藻悬浮液的稳定状态,使其形成絮凝体,而阴极生成的氢气气泡可以附着在微藻絮凝体上面,使其上浮到液体,在培养液表面对微藻进行采收。电絮凝的絮凝效率取决于电极材料、电解时间、电流密度以及培养液组成成分<sup>[45]</sup>。在电絮凝时可根据要求添加适量絮凝载体以提供必需的絮凝核心,这对生成稳定絮体至关重要。

研究表明在使用电絮凝技术对微藻进行采收时,铝的絮凝效率远远高于铁<sup>[46]</sup>。这主要是因为电絮凝过程中,铝的导电性能与铁相比更加优良,在相同的电解条件下,金属铝能产生更多的金属离子<sup>[47]</sup>。Landels 等<sup>[45]</sup>利用电絮凝可以有效采收细胞直径从 1–40  $\mu\text{m}$  的 9 种微藻,既包括淡水微藻,也包括海水微藻。添加铝盐后采收效率进一

步增加。Liu 等<sup>[48]</sup>以铝电极絮凝 20 min 时, 杜氏盐藻(*Dunaliella salina*)絮凝效率为 97%, 同时能耗较低, 仅为 0.11 kWh/kg 干重。章表明等<sup>[49]</sup>在电流密度为 12 mA/cm<sup>2</sup>, 通电时间为 30 min, 电极板相距 2.0 cm 的实验条件下, 絮凝采收海洋微藻湛江等鞭金藻(*Isochrysis zhangjiangensis*), 絮凝效率高于 92%, 并且电絮凝过程的能耗仅为 2.0 kWh/kg 干重。

电絮凝具有絮凝效率高、适用范围广等优点, 但絮凝过程中使用传统的电极产生的金属离子会残留在培养液和收集的微藻中, 可能会影响培养液的回收利用和微藻后续产品的加工利用。此外该技术需要定期更换电极, 增加了生产成本<sup>[45]</sup>。石墨基电极<sup>[50]</sup>的开发能有效解决金属离子残留问题。未来新型电极的研究开发是电絮凝的重要研究领域。

### 2.2.2 磁絮凝

磁絮凝(magnetic flocculation)是利用磁性纳米或微米颗粒絮凝吸附在微藻细胞表面, 在外部磁场的作用下收集微藻的过程<sup>[51]</sup>。藻细胞外表面分布着大量的羟基、胺基和磷酸基等官能团, 通过这些官能团与磁性颗粒之间存在静电吸引作用, 接着通过在外施加磁场驱动磁性纳米颗粒将微藻与培养液分离, 进而对微藻进行采收。

常用的磁性颗粒包括裸磁颗粒、具有光活性的磁性颗粒和改性的磁颗粒等。裸磁颗粒在一定的条件下也具有显著的微藻收获能力, 如 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub><sup>[52]</sup>。光磁颗粒不仅有被磁性物质吸引的特点, 而且具有光催化活性, 如 ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>。在 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 辅助条件下, 光照促进微藻细胞壁裂解, 有利于释放油脂, 可以大大简化微藻的下游工艺<sup>[53]</sup>。裸磁在采收微藻的过程中也存在一定的局限性, 如现有的磁性颗粒产生的磁场范围小, 一般只有几立方米范围内而且磁场感应强度较低(一般<2 T), 限制了磁絮凝的应用范围<sup>[54]</sup>。另外, 絮凝后还需要物理去磁, 以保证磁颗粒反复应用<sup>[55]</sup>。通过在裸磁材料表面涂覆不同的材料来增加比表面积, 给微藻吸附和桥

架提供更多的活性位点<sup>[52]</sup>。Zhao 等<sup>[52]</sup>以胺甲基化改性植物多酚和 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 为材料制备了一种新型的铁磁性颗粒, 该颗粒可直接回收培养浓度为 20 g/L 的小球藻(*Chlorella vulgaris*), 絮凝效率可以达到 93.0%, 并且回收的磁性颗粒在性能方面表现出了极高的稳定性, 在使用 5 次之后对小球藻的絮凝效率仍能保持 87.5% 以上。Hu 等<sup>[56]</sup>研制了一种由永磁鼓、分离室和刮板等主要部件组成的磁性分离器, 该磁性分离器对小球藻(*Chlorella ellipsoidea*)的采收效率可以达到 95% 以上。此外, 小球藻的采收效率会随着分离室内液体流量的增加而降低, 当液体流量小于 100 mL/min 时, 采收效率可以维持在 95% 以上<sup>[56]</sup>。

磁絮凝技术虽然具有絮凝效率高、藻类适用范围广泛等优点。但磁絮凝技术仪器操作要求较高, 功能颗粒合成工艺复杂, 设备的运行和维护需要大量的资金投入, 因此使用范围受到限制<sup>[52]</sup>。与化学絮凝技术相比, 物理絮凝技术几乎适用于所有微藻, 但存在仪器设备操作难度大和能耗高等缺点。

## 2.3 生物絮凝技术

生物絮凝主要是利用生物体本身或其代谢产生的粘性物质和生物表面活性剂, 通过网捕或键桥作用使微藻细胞相互聚集, 实现微藻絮凝采收<sup>[41]</sup>。目前生物絮凝技术的研究方向主要分为微生物絮凝、微生物絮凝剂絮凝以及细胞自絮凝三大类。

### 2.3.1 微生物絮凝

在自然界中, 一些微生物(例如真菌、细菌等)可以诱导微藻发生絮凝现象。这些微生物的细胞外聚合物不同<sup>[57]</sup>, 从而影响微藻的采收效果<sup>[58]</sup>。其中真菌通过菌丝与微藻细胞之间的电性中和作用使微藻产生絮凝<sup>[58-61]</sup>, 细菌主要是通过粘附作用聚集微藻细胞<sup>[62-63]</sup>。

Li 等<sup>[61]</sup>从活性污泥中分离获得一株丝状真菌 *Aspergillus niger* hsn26, 在 Ca<sup>2+</sup> 的协助下(钙桥作用下)该真菌对小球藻(*Chlorella vulgaris*)的絮凝

效率可以达到 90% 以上。Lei 等<sup>[63]</sup>使用海杆菌株 *Marinobacter* sp. FL06 直接采收海洋微藻 (*Thalassiosira pseudonana*), 絮凝效率为 92.7%, 并且在该絮凝过程中没有添加任何的金属离子; 此外, 菌株 *Marinobacter* sp. FL06 具有较强的稳定性和适用于采收多种微藻, 在不同的温度和 pH 范围内均能保持良好的絮凝效率。

微生物絮凝与化学絮凝相比具有可生物降解性, 但该技术可能会引发生物安全性问题。

### 2.3.2 微生物絮凝剂絮凝

微生物絮凝剂是指由微生物产生的絮凝活性物质, 将其加入到微藻培养液中对微藻进行絮凝采收。

董新皎等<sup>[64]</sup>提取芽孢杆菌 *Bacillus* sp. WZ01 产生的生物絮凝剂, 在培养液 pH 为 7.5–8.5、培养温度为 20–40 °C、絮凝剂浓度在 40.0–60.0 mg/L 范围内时, 絮凝采收米氏凯伦藻 (*Karenia mikimotoi*) 和塔玛亚历山大藻 (*Alexandrium tamarense*) 2 h 内絮凝效率均达到 80% 以上。Wan 等<sup>[65]</sup>利用单芽孢杆菌 *Solibacillus silvestris* W01 产生的生物絮凝剂, 在没有添加任何额外的金属离子 (如  $\text{Ca}^{2+}$  或  $\text{Fe}^{3+}$  等) 的条件下采收微拟球藻 (*Nannochloropsis oceanica*), 絮凝效率高达 90%, 该生物絮凝剂是由 75.1% 碳水化合物和 24.9% 蛋白质组成的蛋白多糖, 这种组成成分的絮凝剂在絮凝过程中不会影响藻类的正常生长, 还可以避免微藻采收过程中发生污染现象。

微生物絮凝剂具有可生物降解、安全无毒等优点, 因而受到研究人员的广泛关注, 成为生物絮凝技术研究的热门方向之一。但絮凝剂生产工艺复杂、产量低、稳定性差以及存储困难等缺点制约了这项技术在微藻采收中的推广和应用。

### 2.3.3 细胞自絮凝

1988 年 Sukenik 等<sup>[66]</sup>首次观察到微藻细胞的自絮凝 (self-flocculation) 现象。迄今为止, 研究者发现大量的微藻具有自絮凝能力。微藻细胞将合成的糖苷或多糖等絮凝活性物质分泌到细胞表面, 通过与周围微藻细胞之间的相互作用, 从而引发

了藻细胞发生自动聚集絮凝的现象<sup>[67]</sup>。此外, 具有自絮凝能力的微藻不仅对同种类型的藻细胞具有絮凝效果, 还可以诱导其他类型的藻细胞发生絮凝现象<sup>[68]</sup>。在微藻的培养过程中, 温度、光照、pH、溶解氧水平和/或培养基中营养成分 (如 N、P、 $\text{Ca}^{2+}$  含量) 的改变会对微藻细胞的自絮凝现象产生一定的影响<sup>[67]</sup>。

Lv 等<sup>[67]</sup>发现一株具有高自絮凝能力的栅藻 (*Scenedesmus rubescens* SX), 在酸性 pH 条件下细胞生长和自絮凝能力均较低, 而在弱碱性 pH 条件下能显著增加栅藻自絮凝, 同时胞外聚合物中含有羟基和羧基基团的比例增加。Zhao 等<sup>[68]</sup>发现两种难絮凝微藻-栅藻 (*Desmodesmus* sp. ZFY) 和单壳缝藻 (*Monoraphidium* sp. QLY-1) 在单独培养时, 自絮凝率分别为 57.98% 和 32.45%, 但混合培养 4 h 后自絮凝率显著增加, 为 85.33%; 混合培养能显著改变胞外聚合物的浓度和组成, 混合培养的胞外多糖约占总细胞干重的 46.53%, 而单独培养栅藻和单壳缝藻的胞外多糖仅为总细胞干重的 27.01% 和 27.35%。Guo 等<sup>[69]</sup>发现海水微藻斜生栅藻 (*S. obliquus* AS-6-1) 和小球藻 (*C. vulgaris* JSC-7) 不仅可以自絮凝, 而且还能絮凝处于游离状态下的淡水藻株斜生栅藻和小球藻, 并且对游离状态的海水藻株微拟球藻也有将近 60% 的絮凝效率。通过降低 pH 低于小球藻 (*Chlorella vulgaris* JSC-7) 等电点促进细胞自絮凝<sup>[70]</sup>。添加  $\text{Zn}^{2+}$  离子能显著增加四尾栅藻 (*Scenedesmus quadricauda*) 的自絮凝率, 最高可达 86.7%<sup>[71]</sup>。

自絮凝微藻的采收具有环保无污染、安全性高、操作过程简单以及絮凝成本低等优点。但目前能进行自絮凝的微藻种类和数量有限, 此外该技术的可靠性和适用性还有待进一步研究。因此, 细胞自絮凝技术在微藻大规模采收中的应用还需要大量的研究。

## 3 结论与展望

大力发展微藻产业不仅能治理环境和水体污

染、扩展食物来源、缓解耕地和能源紧张,对促进世界经济的可持续健康发展具有十分重要的意义。然而,微藻采收成本过高限制了微藻产业的发展。因此,开发出一种低成本、无污染、高效率的微藻采收技术已经迫在眉睫。

目前微藻采收技术主要包括离心分离、沉降、过滤、浮选和絮凝,其中絮凝技术,尤其是生物絮凝具有环保性高、安全无毒、操作简便等优势,具有巨大的发展潜力。但该技术目前存在的问题包括:(1)生物安全性问题;(2)微生物絮凝剂生产工艺复杂不成熟、生产成本低、絮凝剂稳定性差的问题;(3)自絮凝微藻种类和数量有限、适用范围有限等问题,限制了生物絮凝技术的应用。

因而在未来的研究中,可以通过以下几项措施来发展和完善生物絮凝技术,以促进微藻生产产业的快速发展:(1)建立自絮凝微生物库,筛选出絮凝效率优良的微生物;(2)通过基因改造技术生产、制备絮凝效果优良的微生物絮凝剂菌种,提高絮凝剂的生产产量,提升絮凝效率,增强絮凝剂的稳定性,降低生产成本等;(3)对微藻的最佳絮凝条件进行研究和探索,减少絮凝时间,降低絮凝成本;(4)加大力度寻找具有自絮凝能力的微藻,建立自絮凝微藻种类库。

## REFERENCES

- [1] Zhang HY, Zhang XZ. Microalgal harvesting using foam flotation: A critical review[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2019, 120: 176-188
- [2] Cai JL, Chen ML, Wang GC, et al. Fermentative hydrogen and polyhydroxybutyrate production from pretreated cyanobacterial blooms[J]. *Algal Research*, 2015, 12: 295-299
- [3] Fu BL, Pan GH, Zhu DL, et al. Effects of different nitrogen sources on the photosynthetic activity, growth and neutral lipid accumulation of *Skeletonema*[J]. *Journal of Tianjin University of Science & Technology*, 2014, 29(3): 16-22 (in Chinese)  
付宝龙, 潘光华, 朱大玲, 等. 不同氮源对骨条藻光合活性、生长和中性脂积累的影响[J]. *天津科技大学学报*, 2014, 29(3): 16-22
- [4] Garzon-Sanabria AJ, Davis RT, Nikolov ZL. Harvesting *Nannochloris oculata* by inorganic electrolyte flocculation: Effect of initial cell density, ionic strength, coagulant dosage, and media pH[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 118: 418-424
- [5] Mata TM, Martins AA, Caetano NS. Microalgae for biodiesel production and other applications: A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14(1): 217-232
- [6] Suparmaniam U, Lam MK, Uemura Y, et al. Insights into the microalgae cultivation technology and harvesting process for biofuel production: A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 115: 109361
- [7] Heasman M, Diemar J, O'Connor W, et al. Development of extended shelf-life microalgae concentrate diets harvested by centrifugation for bivalve molluscs — a summary[J]. *Aquaculture Research*, 2000, 31(8/9): 637-659
- [8] Zhang JQ, Yuan Y, Jin WB. Study on the efficiency of centrifugal separation device for microalgae cultivated in municipal wastewater[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2018, 44(7): 35-40 (in Chinese).  
张剑桥, 袁媛, 金文标. 城市污水培养微藻离心分离装置效能的研究[J]. *给水排水*, 2018, 44(7): 35-40
- [9] Fan H, Han P, Wang JH, et al. Status and prospects of microalgae harvesting with biological flocculation[J]. *Journal of Biology*, 2017, 34(2): 26-32 (in Chinese)  
樊华, 韩佩, 王菁晗, 等. 微藻生物采收技术的现状和展望[J]. *生物学杂志*, 2017, 34(2): 26-32
- [10] de Baerdemaeker T, Lemmens B, Dotremont C, et al. Benchmark study on algae harvesting with backwashable submerged flat panel membranes[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 129: 582-591
- [11] Rossignol N, Vandanjon L, Jaouen P, et al. Membrane technology for the continuous separation microalgae/culture medium: compared performances of cross-flow microfiltration and ultrafiltration[J]. *Aquacultural Engineering*, 1999, 20(3): 191-208
- [12] Liang H, Yang YL, Gong WJ, et al. Effect of pretreatment by permanganate/chlorine on algae fouling control for ultrafiltration (UF) membrane system[J]. *Desalination*, 2008, 222(1/3): 74-80
- [13] Kanchanatip E, Su BR, Tulaphol S, et al. Fouling characterization and control for harvesting microalgae *Arthrospira (Spirulina) maxima* using a submerged, disc-type ultrafiltration membrane[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 209: 23-30
- [14] Wu XT, Tao Y, Zhou CW, et al. The microalgae harvesting efficiency and fouling characterization with ceramic ultrafiltration membrane[J]. *Applied Chemical Industry*, 2017, 46(6): 1027-1032, 1046 (in Chinese)  
吴晓甜, 陶益, 周灿炜, 等. 陶瓷膜过滤收获微藻的效能与膜污染特征[J]. *应用化工*, 2017, 46(6): 1027-1032, 1046



- [15] Zhang KF, Wang S, Nie RF, et al. Study on the performance of different typical filters under the influent of high algae-laden water[J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2016, 31(6): 549-555 (in Chinese).  
张克峰, 王珊, 聂荣飞, 等. 高藻进水条件下常见滤池过滤性能研究[J]. 山东建筑大学学报, 2016, 31(6): 549-555
- [16] Schiel DR, Gunn TD. Effects of sediment on early life history stages of habitat-dominating fucoid algae[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2019, 516: 44-50
- [17] Ogburn ZL, Vogt F. Microalgae as embedded environmental monitors[J]. Analytica Chimica Acta, 2017, 954: 1-13
- [18] Priyadarshani WNC. Seasonal and interannual variability of coccolithophore downward fluxes and potential environmental drivers in the Northern South China Sea[D]. Hangzhou: Doctoral Dissertation of Zhejiang University, 2018 (in Chinese)  
Priyadarshani WNC. 南海北部颗石藻沉降通量的季节、年际变化及其潜在环境驱动因子[D]. 杭州: 浙江大学博士学位论文, 2018
- [19] McAndrews RS, Eich A, Ford AK, et al. Algae sediment dynamics are mediated by herbivorous fishes on a nearshore coral reef[J]. Coral Reefs, 2019, 38(3): 431-441
- [20] Zhang HY, Yang L, Zang XM, et al. Effect of shear rate on floc characteristics and concentration factors for the harvesting of *Chlorella vulgaris* using coagulation-flocculation-sedimentation[J]. Science of The Total Environment, 2019, 688: 811-817
- [21] Ren XY. The study on heat-aided flotation for harvesting microalgae[D]. Xi'an: Master's Thesis of Chang'an University, 2018 (in Chinese)  
任香莹. 基于加热预处理的气浮法采收微藻的试验研究[D]. 西安: 长安大学硕士学位论文, 2018
- [22] Xing YW, Gui XH, Pan L, et al. Recent experimental advances for understanding bubble-particle attachment in flotation[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2017, 246: 105-132
- [23] Zhang HY, Liu CH, Kuang YL, et al. Research on harvesting energy microalgae via foam flotation[J]. Renewable Energy Resources, 2016, 34(2): 268-273 (in Chinese)  
张海阳, 刘春华, 匡亚莉, 等. 基于泡沫浮选的能量微藻采收实验研究[J]. 可再生能源, 2016, 34(2): 268-273
- [24] Garg S, Wang LG, Schenk PM. Flotation separation of marine microalgae from aqueous medium[J]. Separation and Purification Technology, 2015, 156: 636-641
- [25] Wang YL, Liu BZ, Jia RB, et al. Counter-current/co-current dissolved air flotation (CCDAF) system for algae-laden surface water treatment[J]. Desalination and Water Treatment, 2018, 130: 37-43
- [26] Wen H. Buoy-bead flotation harvesting technology applied on the microalgae *Chlorella vulgaris* and the mechanisms of physicochemical interactions among microalgae-medium-bead multiphase interfaces[D]. Xi'an: Doctor Dissertation of Chang'an University, 2019 (in Chinese)  
文豪. 小球藻浮珠浮选采收技术及相界面间物理化学作用机理研究[D]. 西安: 长安大学博士学位论文, 2019
- [27] Li XC, Mou CX, Mu G, et al. Performance of dissolved air flotation for marine microalgae harvesting[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2012, 27(4): 355-359 (in Chinese)  
李秀辰, 牟晨晓, 母刚, 等. 海洋微藻的加压机浮采收工艺研究[J]. 大连海洋大学学报, 2012, 27(4): 355-359
- [28] Nguyen HVM, Kim JK, Chang SW. A case study of low pressure air flotation ferryboat for algae removal in Korean rivers and lakes[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2019, 69: 32-38
- [29] Kyzas GZ, Matis KA. Electroflotation process: A review[J]. Journal of Molecular Liquids, 2016, 220: 657-664
- [30] Zhou WJ, Gao LL, Cheng WT, et al. Electro-flotation of *Chlorella* sp. assisted with flocculation by chitosan[J]. Algal Research, 2016, 18: 7-14
- [31] Kydros KA, Gallios GP, Matis KA. Electrolytic flotation of pyrite[J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 1994, 59(3): 223-232
- [32] Pugazhendhi A, Shobana S, Bakonyi P, et al. A review on chemical mechanism of microalgae flocculation via polymers[J]. Biotechnology Reports, 2019, 21: e00302
- [33] Chen L, Wang CW, Wang WG, et al. Optimal conditions of different flocculation methods for harvesting *Scenedesmus* sp. cultivated in an open-pond system[J]. Bioresource Technology, 2013, 133: 9-15
- [34] Guo TT, Lou YJ. Research of flocculent effects of inorganic reagents on *Botryococcus braunii*[J]. Journal of Biology, 2014, 31(2): 90-93 (in Chinese)  
郭婷婷, 娄永江. 6种无机絮凝剂对布朗葡萄藻的絮凝效应[J]. 生物学杂志, 2014, 31(2): 90-93
- [35] Zhao K, Wang YJ, Wu ZJ, et al. Eight different flocculants study of *Chlorella emersonii* flocculation effect[J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2017, 37(1): 54-59 (in Chinese)  
赵奎, 王亚君, 武振晋, 等. 8种不同絮凝剂对埃氏小球藻絮凝效应的研究[J]. 山西农业大学学报: 自然科学版, 2017, 37(1): 54-59
- [36] Peng C, Su HB, Xiong Q, et al. Effects of flocculants on recovery of *Haematococcus pluvialis*[J]. Chinese Journal of Bioprocess Engineering, 2017, 15(2): 1-6 (in Chinese)  
彭超, 苏会波, 熊强, 等. 絮凝剂对雨生红球藻采收的影响[J]. 生物加工过程, 2017, 15(2): 1-6
- [37] Wu SC, Xie XJ, Huan L, et al. Selection of optimal flocculant for effective harvesting of the fucoxanthin-rich marine microalga *Isochrysis galbana*[J]. Journal of Applied Phycology, 2016, 28(3): 1579-1588

- [38] Wan C, Zhang XY, Zhao XQ, et al. Harvesting microalgae via flocculation: a review[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2015, 31(2): 161-171 (in Chinese)  
万春, 张晓月, 赵心清, 等. 利用絮凝进行微藻采收的研究进展[J]. 生物工程学报, 2015, 31(2): 161-171
- [39] Wei CY, Huang Y, Liao Q, et al. Adsorption thermodynamic characteristics of *Chlorella vulgaris* with organic polymer adsorbent cationic starch: Effect of temperature on adsorption capacity and rate[J]. Bioresource Technology, 2019, 293: 122056
- [40] Rahul R, Kumar S, Jha U, et al. Cationic inulin: a plant based natural biopolymer for algal biomass harvesting[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2015, 72: 868-874
- [41] Rashid N, Rehman SU, Han JI. Rapid harvesting of freshwater microalgae using chitosan[J]. Process Biochemistry, 2013, 48(7): 1107-1110
- [42] Feng SS, Wu XQ, Wang CB, et al. Optimization of preparation conditions of cationic starch and its flocculation efficiency on field cyanobacteria[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 41(5): 37-42 (in Chinese)  
冯闪闪, 吴幸强, 王纯波, 等. 阳离子淀粉制备条件优化及其对野外蓝藻的絮凝效果[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(5): 37-42
- [43] Meramo-Hurtado S, Alarcón-Suesca C, González-Delgado ÁD. Exergetic sensibility analysis and environmental evaluation of chitosan production from shrimp exoskeleton in Colombia[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 248: 119285
- [44] Kavallauskaite R, Klimaviciute R, Zemaitaitis A. Factors influencing production of cationic starches[J]. Carbohydrate Polymers, 2008, 73(4): 665-775
- [45] Landels A, Beacham TA, Evans CT, et al. Improving electrocoagulation floatation for harvesting microalgae[J]. Algal Research, 2019, 39: 101446
- [46] Dassey AJ, Theegala CS. Reducing electrocoagulation harvesting costs for practical microalgal biodiesel production[J]. Environmental Technology, 2014, 35(6): 691-697
- [47] Barros AI, Gonçalves AL, Simões M, et al. Harvesting techniques applied to microalgae: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 41: 1489-1500
- [48] Liu Q, Zhang M, Lv T, et al. Energy-producing electro-flocculation for harvest of *Dunaliella salina*[J]. Bioresource Technology, 2017, 241: 1022-1026
- [49] Zhang BM, Wang JY, Wang DZ, et al. Harvesting of microalgae *Isochrysis zhangjiangensis* by electro-flocculation[J]. Chinese Journal of Bioprocess Engineering, 2016, 14(1): 54-57 (in Chinese)  
章表明, 王加友, 王大志, 等. 电絮凝法收集湛江等鞭金藻[J]. 生物加工过程, 2016, 14(1): 54-57
- [50] Zhang C, Li Y, Shuai DM, et al. Graphitic carbon nitride (g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)-based photocatalysts for water disinfection and microbial control: A review[J]. Chemosphere, 2019, 214: 462-479
- [51] Jangyubol K, Kasemwong K, Charoenrat T, et al. Magnetic-cationic cassava starch composite for harvesting *Chlorella* sp. TISTR8236[J]. Algal Research, 2018, 35: 561-568
- [52] Zhao Y, Wang XY, Jiang XX, et al. Harvesting of *Chlorella vulgaris* using Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> coated with modified plant polyphenol[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(26): 26246-26258
- [53] Seo JY, Jeon HJ, Kim JW, et al. Simulated-sunlight-driven cell lysis of magnetophoretically separated microalgae using ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> octahedrons[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2018, 57(5): 1655-1661
- [54] Gómez-Pastora J, Xue XZ, Karampelas IH, et al. Analysis of separators for magnetic beads recovery: From large systems to multifunctional microdevices[J]. Separation and Purification Technology, 2017, 172: 16-31
- [55] Cerff M, Morweiser M, Dillschneider R, et al. Harvesting fresh water and marine algae by magnetic separation: Screening of separation parameters and high gradient magnetic filtration[J]. Bioresource Technology, 2012, 118: 289-295
- [56] Hu YR, Guo C, Xu L, et al. A magnetic separator for efficient microalgae harvesting[J]. Bioresource Technology, 2014, 158: 388-391
- [57] Cai JL, Wei Y, Zhao YP, et al. Production of polyhydroxybutyrate by the marine photosynthetic bacterium *Rhodovulum sulfidophilum* P5[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2012, 30(4): 620-626
- [58] Al-Hothaly KA. An optimized method for the bio-harvesting of microalgae, *Botryococcus braunii*, using *Aspergillus* sp. in large-scale studies[J]. MethodsX, 2018, 5: 788-794
- [59] Nasir NM, Yunus FH, Jusoh HH, et al. Subtopic: Advances in water and wastewater treatment harvesting of *Chlorella* sp. microalgae using *Aspergillus niger* as bio-flocculant for aquaculture wastewater treatment[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 249: 109373
- [60] Luo SS, Wu XD, Jiang HB, et al. Edible fungi-assisted harvesting system for efficient microalgae bio-flocculation[J]. Bioresource Technology, 2019, 282: 325-330
- [61] Li Y, Xu YT, Liu L, et al. Flocculation mechanism of *Aspergillus niger* on harvesting of *Chlorella vulgaris* biomass[J]. Algal Research, 2017, 25: 402-412
- [62] Nguyen TDP, van Anh Le T, Show PL, et al. Bioflocculation formation of microalgae-bacteria in enhancing microalgae harvesting and nutrient removal from wastewater effluent[J]. Bioresource Technology, 2019, 272: 34-39
- [63] Lei XQ, Zheng W, Ding HY, et al. Effective harvesting of the marine microalga *Thalassiosira pseudonana* by

- Marinobacter* sp. FL06[J]. Bioresource Technology, 2018, 269: 127-133
- [64] Dong XJ, Shen JL, Shen P. Study on removing the red tide microalgae via bioflocculant produced by *Bacillus* sp. strain[J]. Journal of Safety and Environment, 2016, 16(5): 212-215 (in Chinese)
- 董新姣, 沈佳丽, 沈萍. 一株芽孢杆菌产生物絮凝剂去除赤潮微藻的研究[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(5): 212-215
- [65] Wan C, Zhao XQ, Guo SL, et al. Bioflocculant production from *Solibacillus silvestris* W01 and its application in cost-effective harvest of marine microalga *Nannochloropsis oceanica* by flocculation[J]. Bioresource Technology, 2013, 135: 207-212
- [66] Sukenik A, Bilanovic D, Shelef G. Flocculation of microalgae in brackish and sea waters[J]. Biomass, 1988, 15(3): 187-199
- [67] Lv JP, Guo BW, Feng J, et al. Integration of wastewater treatment and flocculation for harvesting biomass for lipid production by a newly isolated self-flocculating microalga *Scenedesmus rubescens* SX[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 240: 118211
- [68] Zhao FY, Xiao JM, Ding W, et al. An effective method for harvesting of microalga: Coculture-induced self-flocculation[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2019, 100: 117-126
- [69] Guo SL, Zhao XQ, Wan C, et al. Characterization of flocculating agent from the self-flocculating microalga *Scenedesmus obliquus* AS-6-1 for efficient biomass harvest[J]. Bioresource Technology, 2013, 145: 285-289
- [70] Alam MA, Wan C, Guo SL, et al. Characterization of the flocculating agent from the spontaneously flocculating microalga *Chlorella vulgaris* JSC-7[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2014, 118(1): 29-33
- [71] Aljuboori AHR, Uemura Y, Thanh NT. Flocculation and mechanism of self-flocculating lipid producer microalga *Scenedesmus quadricauda* for biomass harvesting[J]. Biomass and Bioenergy, 2016, 93: 38-42

## 征订启事

### 欢迎订阅《微生物学通报》

《微生物学通报》创刊于1974年,月刊,是中国科学院微生物研究所和中国微生物学会主办,国内外公开发行,以微生物学应用基础研究及技术创新与应用为主的综合性学术期刊。刊登内容包括:工业、海洋、环境、基础、农业、食品、兽医、水生、药物、医学微生物学和微生物蛋白质组学、功能基因组、工程与药物等领域的最新研究成果、产业化新技术和新进展,以及微生物学教学研究改革等。

本刊为中文核心期刊,中国科技核心期刊,CSCD核心期刊,曾获国家优秀科技期刊三等奖,中国科学院优秀科技期刊三等奖,北京优秀科技期刊奖,被选入新闻出版总署设立的“中国期刊方阵”并被列为“双效”期刊。

据中国科学技术信息研究所信息统计,本刊2012年至今以国内“微生物、病毒学类期刊”综合评价总分第一而蝉联“百种中国杰出学术期刊奖”,并入选“中国精品科技期刊”,成为“中国精品科技期刊顶尖学术论文(F5000)”项目来源期刊。

欢迎广大读者到邮局订阅或直接与本刊编辑部联系购买,2020年每册定价130元,全年1560元,我们免邮费寄刊。

邮购地址:(100101)北京朝阳区北辰西路1号院3号中国科学院微生物研究所《微生物学通报》编辑部

Tel: 010-64807511; E-mail: bjb@im.ac.cn, tongbao@im.ac.cn

网址: <http://journals.im.ac.cn/wswxtbcn>

国内邮发代号: 2-817; 国外发行代号: M413