

微藻采收方法的研究进展

郭锁莲^{1,2*} 赵心清² 白凤武²

- (1. 沈阳化工大学 制药与生物工程学院 辽宁 沈阳 110142)
(2. 上海交通大学生命科学技术学院 微生物国家重点实验室 上海 200240)

摘要: 微藻的生产过程可以实现能源生产、废水净化和 CO₂ 减排的高度耦合, 在能源危机日益紧张、环境问题日趋严峻的今天, 微藻的开发利用具有重要的研究价值和经济、社会效益。制约微藻产业化的瓶颈问题是采收成本过高, 一种经济合理的采收方法不但可以大大降低生产成本, 还可以奠定微藻产业化发展的基础。本文对目前应用较为普遍的微藻采收方法进行了介绍, 重点阐述了絮凝法采收微藻, 以期对微藻的低成本高效率采收以及产业化发展提供帮助。

关键词: 微藻, 采收, 絮凝, 生物絮凝

Research progress in harvesting microalgae — a review

GUO Suo-Lian^{1,2*} ZHAO Xin-Qing² BAI Feng-Wu²

- (1. College of Pharmaceutical and Biological Engineering, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang, Liaoning 110142, China)
(2. State Key Laboratory of Microbial Metabolism, School of Life Sciences and Biotechnology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Microalgae have been considered as promising candidates in integrating CO₂ mitigation, nutrients degradation in water systems, and energy capture from sunlight. Therefore, it is important for sustainable development via acceleration of microalgae research to address the problems of environmental pollution and energy shortage. However, high cost in biomass recovery is the major bottleneck in microalgal-based industrial applications, and a cost-effective method in microalgal biomass recovery is the key to this issue. Here, we reviewed the methods for microalgae harvesting, including sedimentation, centrifugation, filtration and flocculation. Among these methods, the progress and prospect in flocculation are especially focused so that to propose options for the cost-effective biomass recovery and microalgal industrialization.

Keywords: Microalgae, Harvesting methods, Flocculation, Bio-flocculation

传统意义上的微藻是鱼类养殖重要的饲料饵料^[1-2], 而在环境污染、能源危机日趋严峻的今天, 微藻对社会可持续发展的意义更为重大^[3]。由于微藻可以高效地利用 CO₂ 将光能转化为化学能, 而且

在众多固碳生物中, 微藻的 CO₂ 转化效率是陆地高等植物的 10-50 倍^[3-4]; 此外, 微藻还可以将污水中的氮磷等营养物质转化为体内有机化合物, 这些化合物中包括不饱和脂肪酸和色素等高附加值产品,

基金项目: 国家 973 计划项目(No. 2011CB200905); 嘉兴市科技研究计划项目(No. 2013AZ21009)

*通讯作者: Tel: 86-21-34208028; Fax: 86-21-34208028; 信箱: gslian@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2014-07-28; 接受日期: 2014-09-29; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2014-10-14

也有能够转化为能源产品的碳水化合物和油脂^[5-7]。微藻不但能够改善环境,而且还能够获得“环境增值能源”以及其他高附加值产品^[8-10],可以在生产应用过程中实现 CO₂ 减排、废水净化和资源能源生产的高度耦合,因此,受到世界各国政府以及研究机构的广泛关注^[9-12]。

虽然微藻用途广泛,但是在产业化过程中仍然面临着成本过高的问题,其中最大的瓶颈就是微藻的采收^[13]。由于微藻个体微小(一般在 1–30 μm),细胞表面带有负电荷,培养浓度低(通常为 0.5–3.0 g/L)等特点,给采收带来很大困难。随着微藻产业的快速发展,微藻采收在整个产业链中的重要性逐渐凸显。据估算,该环节可能占整个产业生产成本的 20%–30%。因此,寻求一种高效率、低成本的采收方法是当前亟需解决的问题^[14]。为此学者们进行了大量的研究工作,本文综述了目前微藻采收中的常用方法,重点介绍了絮凝法采收微藻,以期对低成本高效采收微藻以及微藻的产业化发展提供帮助。

1 微藻采收方法的概述

目前,应用于微藻采收的方法主要有沉降、离心、过滤、浮选和絮凝法^[15-16]。

1.1 沉降法

沉降法是在重力的作用下使微藻沉降采收的方法,沉降效率主要受藻细胞密度影响。铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)由于细胞内含有气泡导致细胞密度降低,因此微胞藻的沉降效率远小于细胞密度大的硅藻(*Melosira* sp.)^[17]。沉降法适用于细胞密度大的微藻如硅藻(*Asterionella formosa*, *Melosira* sp.),主要用于污水处理,存在的主要问题是效率低、耗时长。

1.2 离心法

离心法是目前应用最广的微藻采收方法^[18-20]。早在 1991 年,Chisti 等^[21]就提到利用离心法采收微藻。随后 Heasman 等^[22]采用离心法对 9 种微藻进行采收,结果表明,采收效率与微藻的沉降特性、沉降深度以及停留时间有关,在合适的条件下,微藻

采收率可达 95%。离心法采收效率高、易于操作、可连续工作、但是能耗大、运行成本较高,因此仅限于高附加值产品的开发应用中。

1.3 过滤法

过滤法是常用的固液分离法,利用压力或吸力的作用,将培养液排到膜的另一侧,而藻细胞被截留下来。影响过滤最主要的因素是微藻细胞的大小:细胞较大(较长)或以群体形式存在的微藻可以被截留下来,而个体较小的微藻却容易堵塞滤膜的孔径,使滤膜失效^[23-24]。因此,过滤法可用于采收个体较大的空星藻(*Coelastrum* sp.)和螺旋藻(*Spirulina* sp.),但是对于个体较小的微藻(细胞直径<30 μm)如微拟球藻(*Nannochloropsis* sp.)、小球藻(*Chlorella* sp.)来说过滤采收的效果并不理想^[25-27],另外定期更换滤膜也会增加采收成本^[28]。

1.4 浮选法

浮选法是利用大量极其微小的气泡(直径<0.1 mm)附着于微藻细胞表面,使其密度变低,上浮到液体表面,再将悬浮物与液体进行分离,实现微藻的富集采收^[29]。Cheng 等^[30]以臭氧微气泡作为载体,利用溶气浮法连续高效地采集了斜生栅藻(*Scenedesmus obliquus* FSP-3),但如何高效率、低能耗地产生微气泡仍是浮选法的主要瓶颈^[31]。

上述方法均存在不同的问题,例如沉淀法效率低、耗时长;过滤法易堵塞,需要定期更换滤膜;离心法、浮选法耗能大。因此,在微藻产业中,低成本、高效率的采收方法仍需要深入研究。

2 絮凝采收微藻

絮凝技术早期用于污水处理,20 世纪 80 年代被用于微藻采收,但并未见在大规模微藻培养中应用,直到 2005 年藻类生产生物燃料成为热点,利用絮凝技术采收微藻的研究才得到人们的重视^[32-33]。絮凝采收微藻是通过电中和、架桥或/和网捕作用,使分散的带电荷藻细胞聚集到一起,进而实现固液分离的采收过程。絮凝技术可以单独作为一种采收方法,也可以用在微藻采收的前处理中,耦合其他采

收方法进而得到更好的采收效果。常见的絮凝方法有: 化学絮凝、物理絮凝和生物絮凝^[34]。

2.1 化学絮凝

化学絮凝是目前应用最为广泛的一种絮凝采收微藻的方法, 通常采用阳离子絮凝剂, 如金属盐类和高分子聚合物类等, 通过中和或降低微藻表面的负电荷或/和键桥作用, 使藻细胞相互聚集^[35-40]。

2.1.1 金属离子: 用于微藻絮凝采收的金属离子主要有 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} , 这些金属离子可以通过电中和作用消除微藻细胞表面所带的负电荷, 降低细胞间的静电排斥, 达到絮凝的效果; 而且在特定的 pH 条件下, 这些金属离子还可形成 $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{s})$ 、 $\text{Fe}_3(\text{OH})_3(\text{s})$ 、 $\text{CaCO}_3(\text{s})$ 和 $\text{Mg}(\text{OH})_2(\text{s})$ 等难溶物质, 以网捕沉淀作用促进微藻的絮凝沉降; 此外, Al^{3+} 、 Fe^{3+} 等金属盐还能形成 $[\text{Al}(\text{OH})_3]_n$ 、 $[\text{Fe}(\text{OH})_3]_n$ 等聚合物, 以吸附架桥形式作用于藻细胞使其絮凝沉淀。Papazi 等^[35]研究了包括 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 在内的 12 种金属盐对小球藻 (*C. minutissima*) 的絮凝效果, 结果发现 Al^{3+} 絮凝卷扫和夹杂作用最明显, 采收效果最好。然而, 虽然铝盐絮凝效果好、工艺成熟, 但是铝盐有毒, 会对水体造成二次污染, 而且还可能对微藻生物质的后续加工利用造成影响, 因此, 制约了其在微藻采收中的广泛应用。

2.1.2 高分子聚合物: 通过吸附架桥及网捕作用, 实现微藻的絮凝采收。高分子聚合物可分为无机和有机高分子絮凝剂两类: 前者主要是前面介绍过的聚合铝盐、聚合铁盐及二者的复合物; 后者主要是以壳聚糖为代表的高分子有机物。壳聚糖是直链型的高分子聚合物, 分子中的游离氨基在稀酸溶液中被质子化, 使壳聚糖分子带上大量正电荷, 成为一种典型的阳离子絮凝剂。高分子聚合物的阳离子活性基团降低中和微藻细胞的表面电荷, 同时压缩了扩散层使微藻细胞脱稳, 再借助吸附架桥作用, 使藻细胞絮凝沉降。郑必胜等^[41]将壳聚糖用于小球藻 (*Chlorella sp.*) 的采收, 取得了良好的采收效果。而 Beach 等^[42]比较了壳聚糖和金属盐(铝盐和铁盐)对

富油新绿藻(*Neochloris oleoabundans*)的絮凝效果, 结果发现: 壳聚糖的絮凝效果较好, 100 mg/L 壳聚糖对富油新绿藻(*N. oleoabundans*)的絮凝效率可达 95%, 远高于同一浓度下铁盐、铝盐的絮凝效率。

2.1.3 其他化学絮凝: Folkman 等^[43]通过向藻液中加入石灰, 提高了溶液中的 pH 值, 使藻细胞产生了絮凝沉降现象, 但是得到的絮凝体中石灰含量远高于微藻细胞的含量。Chen 等^[39]向海洋微藻 (*Dunaliella sp.* HTBS) 中加入氨水, 处理 3 h 后絮凝效率达到 91.2%, 该方法不但得到了较好的絮凝效果, 而且剩余富含氮的液体还可以循环利用, 以及用于微藻的培养。

虽然化学絮凝具有采收效率高、操作简单、工艺成熟等优点, 但絮凝剂的使用不但会增加生产成本, 而且絮凝剂的残留还会给下游处理带来很大麻烦, 因此, 寻找一种安全、高效、低廉的絮凝剂是当前化学絮凝采收微藻研究中的一个重要课题。

2.2 物理絮凝

物理法絮凝微藻可以解决化学法添加絮凝剂造成的污染问题, 利用外加电场打破微藻个体自身静电平衡, 使藻细胞相互聚集, 达到絮凝效果。

2.2.1 电场絮凝: 在外加电场作用下的载体絮凝技术。在水溶液中带有负电荷的微藻细胞, 被周围液膜包覆, 达到自身静电平衡, 在外加电场的作用下打破了这种平衡, 使藻细胞在载体表面聚集形成大的絮凝体。Poleman 等^[44]利用电场絮凝的方法处理 100 L 藻培养液, 处理 35 min 藻细胞采收效率可达得到 80%–95%, 降低电压会影响藻细胞的采收效率, 但是会节省能量消耗; 减少电极表面积或增大两极间的距离同样可以节省能耗, 但是都是以降低采收效率为代价的。因此, 该方法虽有良好的采收效果, 但是由于仪器设备技术要求比较高, 能耗大, 而受限制。

2.2.2 电解絮凝: 利用阳极的铝电极和阴极的氢电极在电解作用下生成铝离子和氢气微泡, 铝离子通过中和或降低藻细胞表面的负电荷, 使微藻形成絮凝体, 而氢气微泡附着于絮凝体上使其上浮, 从而

实现微藻的富集。Uduman 等^[45]利用电解法处理绿球藻(*Chlorococcum* sp.), 采收效率可达 98%。与化学法相比, 电解絮凝“絮凝剂”用量要少很多, 而且溶液中残留的金属离子也较少, 但是该方法最大缺点需要定期更换电极, 进而增加了生产成本。

虽然与化学法相比, 物理法絮凝“绿”色环保些, 但效率低、能耗大、成本高, 不适用于微藻的规模化应用^[44-46]。

2.3 生物絮凝

生物絮凝是利用生物体本身或其代谢产生的粘性物质, 通过网捕或键桥作用, 使藻细胞相互聚集, 对微藻进行采收的过程。

2.3.1 微生物絮凝微藻: 据报道, 真菌可以利用带正电荷的菌丝与带负电荷的藻细胞通过电中和作用, 使微藻絮凝^[47]。Zhou 等^[48]将黑曲霉(*Aspergillus* sp. UMNFO1) 与生长到指数末期的小球藻(*C. vulgaris* UMN235) 共培养 24 h, 得到了直径为 2–5 mm 的微藻-真菌颗粒, 将此微藻-真菌颗粒用于污水处理, 氨、氮以及磷的去除率均超过 50%, 该方法不但有效收集了微藻藻体, 而且得到的絮凝颗粒还可以用于污水处理, 具有重要的应用价值。

另外, 一些细菌也可以诱导微藻产生絮凝现象^[49-50]。Lee 等^[50]将具有絮凝性状的细菌与颗石藻(*Pleurochrysis carterae*) 共培养, 24 h 后颗石藻(*P. carterae*) 的采收效率超过 90%, 浓缩倍数达到 226 倍, 该方法不但高效地采收了藻细胞, 而且剩余的培养液无需额外处理即可循环利用。

这种直接将微生物加入微藻培养液中进行采收的方法, 可以避免化学絮凝剂对终产物的污染, 但是可能引发的生物安全性问题仍然困扰着人们。

2.3.2 微生物剂絮凝微藻: 将微生物产生的絮凝活性物质提取出来加入到微藻的培养液中, 进行微藻的絮凝采收。Oh 等^[51]将从芽孢杆菌(*Paenibacillus* sp. AM49) 提取得到的絮凝物质添加到小球藻(*C. vulgaris*) 的培养液中, 得到的絮凝效率为 83%, 远高于同浓度金属离子絮凝剂(硫酸铝)和有机大分子

絮凝剂(聚丙烯酰胺)的絮凝效率。万春等从土壤芽孢杆菌(*Solibacillus silvestris* W01) 中分离得到的絮凝活性物质不但可以絮凝淡水藻小球藻(*C. vulgaris*) 和斜生栅藻(*S. obliquus*), 而且对海洋藻微拟球藻(*N. oceanica*) 的絮凝效率也超过 80%, 剩余的培养液无需额外处理即可用于微藻培养^[52]。

虽然利用微生物絮凝微藻取得了良好的采收效果, 然而微生物的培养、絮凝物质的获得都会增加生产成本; 若不进行预处理, 直接将微生物及培养液一起加入到藻液中, 会给后续处理带来麻烦, 而且如果处理不当可能会对微藻产品造成污染, 甚至还会引发生物安全性问题^[32,50]。

2.3.3 细胞自絮凝: 微藻细胞自絮凝现象由来已久, 早在 1988 年, Sukenik 等在户外开放培养和实验室封闭培养中均发现了藻细胞自絮凝的现象^[53]。但直到最近藻细胞自絮凝机制才被揭示: 在培养过程中由于微藻自身合成的糖苷^[54]或多糖^[55-56]等絮凝活性物质分泌到细胞表面, 与周围藻细胞相互作用, 进而引发了细胞自絮凝现象。研究还指出培养过程中的营养成分(如 N、P、Ca²⁺ 的浓度)和/或生长条件(如 pH、温度、光照等因素)的变化会对藻细胞的自絮凝现象产生影响^[54-55,57]。

另外, 具有自絮凝性状的藻细胞不但可以使同种类型的藻细胞絮凝, 而且还可以引发其他种类游离藻细胞产生絮凝现象^[54-55,57-58]。Schenk 等^[58]将具有细胞自絮凝特性的硅藻(*Melosira* sp.) 加入到游离的微拟球藻(*N. oceanica*) 培养液中, 使原本游离的微拟球藻(*N. oceanica*) 产生了细胞絮凝的现象; 荷兰学者 Salim 等^[57,59]将具有细胞自絮凝特性的镰形纤维藻(*Ankistrodesmus falcatus*)、斜生栅藻(*S. obliquus*)、扁藻(*Tetraselmis suecica*) 分别添加到游离的小球藻(*C. vulgaris*) 和新绿球藻(*N. oleoabundans*) 培养液中, 结果发现游离的藻细胞均出现了絮凝现象并且以较快的速度进行沉降。郭锁莲等研究发现斜生栅藻(*S. obliquus* AS-6-1) 和小球藻(*C. vulgaris* JSC-7) 具有良好的细胞自絮凝特性, 此外, 这两株自絮凝藻不但对游离的淡水藻株斜生栅藻(*S. obliquus*

FSP-3)和小球藻(*C. vulgaris* CNW-11)具有良好的絮凝活性, 而且对游离海水藻株微拟球藻的絮凝效率也接近 60%^[54-55]。

与微生物絮凝相比, 利用微藻细胞自絮凝进行采收具有安全好、成本低等优点, 然而由于微藻细胞自絮凝具有藻株特异性, 目前报道具有细胞自絮凝特性的微藻只有斜生栅藻(*S. obliquus*)、小球藻(*C.*

vulgaris)、刚毛绿球藻(*Cladophora aegagrophila*)、骨条藻(*Skeletonema* sp.)、布朗葡萄藻(*Botryococcus braunii*)、镰形纤维藻(*A. falcatus*)和扁藻(*T. suecica*)^[57-63], 而且该方法的可靠性和普遍适用性还需进一步研究, 因此, 利用微藻细胞自絮凝进行微藻采收的规模化应用还有待时日。

文中介绍的微藻采收方法总结如表 1 所示。

表 1 不同微藻采收方法的比较
Table 1 Comparison of different methods in microalgae harvest

采收方法 Harvesting methods	适用藻类 Microalgae	采收效率 Efficiency of biomass recovery (%)	优缺点 Features	参考文献 Reference
沉降法 Sedimentation	适用于细胞密度大的微藻如 硅 藻 (<i>Asterionella formosa</i> , <i>Melosira</i> sp.)	20-55	方法简单、仪器设备成本低、能耗低, 存在的主要问题是效率低、耗时长, 稳定性差	[17]
离心法 Centrifugation	微藻普遍适用	80-90	采收效率高、易于操作、可连续工作, 但是能耗大、运行成本高	[22]
过滤法 Filtration	个体较大的微藻如空星藻 (<i>Coelastrum</i> sp.)和螺旋藻 (<i>Spirulina</i> sp.)	70-90	操作简单, 但是易堵塞, 需要定期更换滤膜	[25-28]
浮选法 Flotation	细胞密度小的微藻如斜生栅藻(<i>Scenedesmus</i> sp.)	80-90	采收效率高、对细胞损伤小、耗能大	[30]
化学絮凝 Chemical flocculation	金属离子 Multivalent metal salts	>70	采收效率高、操作简单、工艺成熟, 但絮凝剂的使用会增加生产成本, 而且金属离子的残留会对水体造成二次污染, 此外还会给微藻生物质的后续加工利用带来麻烦	[35]
	高分子聚合物 Polymer	>80	采收效率高、能耗低, 但絮凝剂成本高, 而且高聚合物的残留很难降解, 易造成二次污染	[41]
物理絮凝 Physical flocculation	电场絮凝 Electro flocculation	80-95	采收效果良好, 但仪器设备技术要求较高, 能耗大	[44]
	电解絮凝 Electrolytic flocculation	>95	与化学法相比, 电解絮凝“絮凝剂”用量少, 溶液中残留的金属离子少, 但是定期更换电极, 增加了生产成本	[45]

(待续)

						(续表)
生物絮凝 Biological flocculation	微生物 絮凝	真菌 Fungi	小球藻 (<i>C. vulgaris</i> UMN235)	>80	操作简单, 可避免化学 絮凝剂对终产物的污 染, 但是可能引发生物 安全性问题	[48]
	Microbial floc- culation	细菌 Bacterial	颗石藻(<i>P. carterae</i>)	>90		[50]
Bioflo- cculant	微生物 絮凝剂	芽孢杆菌 (<i>Paenibacillus</i> sp. AM49)、土壤芽孢杆菌 (<i>Solibacillus silvestris</i> W01)产生的絮凝剂	小球藻(<i>C. vulgaris</i>)、斜生 栅藻(<i>S. obliquus</i>)和微拟 球藻(<i>N. oceanica</i>)	>80	采收效果好, 但是微生 物的培养、絮凝物质的 获得会增加生产成本; 此外还存在且絮凝剂 残留和生物安全性问 题	[54-55]
	藻细胞 自絮凝 Auto- flocculation	骨藻(<i>Skeletonema</i>), 镰形 纤维藻 (<i>Ankistrodesmus</i> <i>falcatus</i>)、斜生栅藻(<i>S.</i> <i>obliquus</i>) 和 扁藻 (<i>T.</i> <i>suecica</i>)	微拟球藻 (<i>Nannochloropsis</i> sp.), 小 球藻(<i>C. vulgaris</i>)、富油新 绿藻(<i>N. oleoabundans</i>)和 栅藻(<i>S. obliquus</i> FSP-3)	40-70	安全、环保、成本低, 但是微藻细胞自絮凝 具有藻株特异性, 另 外, 该方法的可靠性和 普遍适用性还需进一 步研究	[52-55]

3 结论与展望

微藻可以用于 CO₂ 减排、污水处理和资源能源生产, 对社会经济的可持续发展具有重大意义。但由于微藻采收成本居高不下, 严重制约了微藻工业化应用。因此, 一种经济高效的采收方法是微藻产业化应用的关键和前提。与离心和浮选等采收方法相比, 絮凝具有能耗少、设备及其维护费用低以及操作方便等明显优势, 在微藻采收中应用广泛。然而传统的化学絮凝和物理絮凝虽然具有较好的采收效率, 但是前者的化学絮凝剂残留对环境造成的二次污染, 以及后者的高能耗及设备成本高均不符合建设环境友好型和经济节约型社会的可持续发展要求。新兴生物絮凝法采收微藻具有安全高效, 并且采收后的培养液无需预处理可直接再用于微藻培养, 最有希望成为经济适用型的微藻采收方法。特别是微藻细胞自絮凝既避免了添加外源微生物造成污染的风险, 又不影响后续微藻加工, 为微藻采收提供了绿色、高效、可行的操作方法。虽然微藻细胞自絮凝研究尚处于起步阶段, 但是该技术的快速发展和成熟应用将会显著降低微藻采收成本, 并促进微藻能源工业化。

参 考 文 献

- [1] Li JJ. Application of the available microalgae as feed: a brief review[J]. Hunan Feed, 2011(2): 29-31 (in Chinese)
李静静. 可利用微藻在水产饲料行业中的应用探讨[J]. 湖南饲料, 2011(2): 29-31
- [2] Draaisma RB, Wijffels RH, Ellen Slegers P, et al. Food commodities from microalgae[J]. Current Opinion in Biotechnology, 2012, 24(2): 169-177
- [3] Georgianna DR, Mayfield SP. Exploiting diversity and synthetic biology for the production of algal biofuels[J]. Nature, 2012, 488(7411): 329-335
- [4] Miao XL, Wu QY. Exploitation of biomass renewable energy sources of microalgae[J]. Renewable Energy, 2003, 3(109): 13-16 (in Chinese)
缪晓玲, 吴庆余. 微藻生物质可再生能源的开发利用[J]. 可再生能源, 2003, 3(109): 13-16
- [5] Ting C, Stephen YP, Yebo L. Nutrient recovery from wastewater streams by microalgae: status and prospects[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 19: 360-369
- [6] Chang YY, Wu ZC, Bian L, et al. Cultivation of *Spirulina platensis* for biomass production and nutrient removal from synthetic human urine[J]. Applied Energy, 2013, 102: 427-431
- [7] Zhao B, Ma J, Zhao Q, et al. Efficient anaerobic digestion of whole microalgae and lipid-extracted microalgae residues for methane energy production[J]. Bioresource Technology, 2014, 161: 423-430
- [8] Olguin EJ. Dual purpose microalgae-bacteria-based systems that treat wastewater and produce biodiesel and chemical products within a biorefinery[J]. Biotechnology Advances, 2012, 30(5): 1031-1046
- [9] Christenson L, Sims R. Production and harvesting of microalgae for wastewater treatment, biofuels, and bioproducts[J].

- Biotechnology Advances, 2011, 29(6): 686-702
- [10] Komolafe O, Velasquez Orta SB, Monje-Ramirez I, et al. Biodiesel production from indigenous microalgae grown in wastewater[J]. Bioresource Technology, 2014, 154: 297-304
- [11] Wijffels RH, Barbosa MJ. An outlook on microalgal biofuels[J]. Science, 2010, 329(5993): 796-799
- [12] Greenwell H, Laurens L, Shields R, et al. Placing microalgae on the biofuels priority list: a review of the technological challenges[J]. Journal of the Royal Society Interface, 2010, 7(46): 703-726
- [13] Li YG, Tan TW, Huang YM. Some scientific issues to be resolved in the process for producing biodiesel from microalgae[J]. China Basic Science, 2009, 11(5): 64-70 (in Chinese)
李元广, 谭天伟, 黄英明. 微藻生物柴油产业化技术中的若干科学问题及其分析[J]. 中国基础科学, 2009, 11(5): 64-70
- [14] Uduman N, Qi Y, Danquah MK, et al. Dewatering of microalgal cultures: a major bottleneck to algae-based fuels[J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2010, 2(1): 012701
- [15] Lin Z, Kuang YL, Guo J, et al. A review of microalgae recovery technology[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2009, 9(6): 1242-1248 (in Chinese)
林喆, 匡亚莉, 郭进, 等. 微藻采收技术的进展与展望[J]. 过程工程学报, 2009, 9(6): 1242-1248
- [16] Zhang HY, Kuang YL, Lin Z. Research progress of harvesting technologies of energy microalgae[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2013, 32(9): 2092-2098 (in Chinese)
张海阳, 匡亚莉, 林喆. 能源微藻采收技术研究进展[J]. 化工进展, 2013, 32(9): 2092-2098
- [17] Henderson R, Parsons SA, Jefferson B. The impact of algal properties and pre-oxidation on solid-liquid separation of algae[J]. Water Research, 2008, 42(8/9): 1827-1845
- [18] Hori K, Okamoto J, Tanji Y, et al. Formation, sedimentation and germination properties of *Anabaena akinetes*[J]. Biochemical Engineering Journal, 2003, 14(1): 67-73
- [19] D'Souza FML, Lecossois D, Heasman MP, et al. Evaluation of centrifuged microalgae concentrates as diets for *Penaes monodon* Fabricius Larvae[J]. Aquaculture Research, 2000, 31(8/9): 66-70
- [20] Grima EM, Belarbi EH, Acién Fernández FG, et al. Recovery of microalgal biomass and metabolites: process options and economics[J]. Biotechnology Advances, 2003, 20(7/8): 491-515
- [21] Chisti Y, Moo-Young M. Fermentation technology, bioprocessing, scale-up and manufacture[A]//Moses M, Cape R E. Biotechnology: the science and the business[C]. New York: Harwood Academic Publishers, 1991: 167-209
- [22] Heasman M, Diemar J, O'Connor W, et al. Development of extended shelf-life microalgae concentrate diets harvested by centrifugation for bivalve mollusks—a summary[J]. Aquacultural Research, 2000, 31(8/9): 637-659
- [23] 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
- [24] 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
- [25] Danquah MK, Gladman B, Moheimani N, et al. Microalgal growth characteristics and subsequent influence on dewatering efficiency[J]. Chemical Engineering Journal, 2009, 151(1/3): 47-57
- [26] Kwon B, Park N, Cho J. Effect of algae on fouling and efficiency of UF membranes[J]. Desalination, 2005, 179(1/3): 203-214
- [27] Gong QL, Cui JZ, Pan KH, et al. Ultrafiltration application in condensing chlorella cultured solution[J]. Marine Sciences, 2004, 28(1): 5-7 (in Chinese)
宫庆礼, 崔建洲, 潘克厚, 等. 超滤技术在单胞藻浓缩中的应用[J]. 海洋科学, 2004, 28(1): 5-7
- [28] Hung MT, Liu JC. Microfiltration for separation of green algae from water[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2006, 51(2): 157-164
- [29] Chen YM, Liu JC, Ju YH. Flotation removal of algae from water[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 1998, 12(1): 49-55
- [30] Cheng YL, Juang YC, Liao GY, et al. Harvesting of *Scenedesmus obliquus* FSP-3 using dispersed ozone flotation[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(1): 82-87
- [31] Jarvis P, Buckingham P, Holden B, et al. Low energy ballasted flotation[J]. Water Research, 2009, 4(14): 3427-3434
- [32] Vandamme D, Foubert I, Muylaert K. Flocculation as a low-cost method for harvesting microalgae for bulk biomass production[J]. Trends in Biotechnology, 2013, 31(4): 233-239
- [33] Schlesinger A, Eisenstadt D, Bar-Gil A, et al. Inexpensive non-toxic flocculation of microalgae contradicts theories; overcoming a major hurdle to bulk algal production[J]. Biotechnology Advances, 2012, 30(5): 1023-1030
- [34] Chen L, Wang C, Wang W, 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
- [35] Papazi A, Makridis P, Divanach P. Harvesting *Chlorella minutissima* using cell coagulants[J]. Journal of Applied Phycology, 2010, 22(3): 349-355
- [36] Banerjee C, Gupta P, Mishra S, et al. Study of polyacrylamide grafted starch based algal flocculation towards applications in algal biomass harvesting[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2012, 51(4): 456-461
- [37] Zheng H, Gao Z, Yin J, et al. Harvesting of microalgae by flocculation with poly (γ -glutamic acid)[J]. Bioresource Technology, 2012, 112: 212-220
- [38] Duan J, Gregory J. Coagulation by hydrolysing metal salts[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2003, 100: 475-502
- [39] Chen F, Liu Z, Li D, et al. Using ammonia for algae harvesting and as nutrient in subsequent cultures[J]. Bioresource Technology, 2012, 121: 298-303
- [40] Vandamme D, Foubert I, Fraeye I, et al. Flocculation of *Chlorella vulgaris* induced by high pH: role of magnesium and calcium and practical implications[J]. Bioresource Technology, 2011, 105: 114-119
- [41] Zheng BS, Cai MY, Guo SY, et al. Application of chitosan to the harvest of *Chlorella*[J]. Sea-Lake Salt & Chemical Industry, 2003, 32(1): 7-9 (in Chinese)

- 郑必胜, 蔡妙颜, 郭祀远, 等. 壳聚糖在小球藻采收中的应用[J]. 盐湖盐与化工, 2003, 32(1): 7-9
- [42] Beach ES, Eckelman MJ, Cui Z, et al. Preferential technological and life cycle environmental performance of chitosan flocculation for harvesting of the green algae *Neochloris oleoabundans*[J]. Bioresource Technology, 2012, 121: 445-449
- [43] Folkman Y, Wachs AM. Removal of algae from stabilization pond effluents by lime treatment[J]. Water Research, 1973, 7(3): 419-435
- [44] Poelman E, De Pauw N, Jeurissen B. Potential of electrolytic flocculation for recovery of micro-algae[J]. Resources, Conservation and Recycling, 1997, 19(1): 1-10
- [45] Uduman N, Bourniquel V, Danquah MK, et al. A parametric study of electrocoagulation as a recovery process of marine microalgae for biodiesel production[J]. Chemical Engineering Journal, 2011, 174(1): 249-257
- [46] Vandamme D, Pontes SC, Goiris K, et al. Evaluation of electro-coagulation-flocculation for harvesting marine and freshwater microalgae[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2011, 108: 2320-2329
- [47] Zhang J, Hu B. A novel method to harvest microalgae via co-culture of filamentous fungi to form cell pellets[J]. Bioresource Technology, 2012, 114: 529-535
- [48] Zhou W, Cheng Y, Li Y, et al. Novel fungal pelletization-assisted technology for algae harvesting and wastewater treatment[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2012, 167(2): 1-15
- [49] Wang H, Laughinghouse HD, Anderson MA, et al. Novel bacterial isolate from Permian groundwater, capable of aggregating potential biofuel-producing microalga *Nannochloropsis oceanica* IMET1[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2012, 78(5): 1445-1453
- [50] Lee AK, Lewis DM, Ashman PJ. Microbial flocculation, a potentially low-cost harvesting technique for marine microalgae for the production of biodiesel[J]. Journal of Applied Phycology, 2009, 21(5): 559-567
- [51] Oh HM, Lee SJ, Park MH, et al. Harvesting of *Chlorella vulgaris* using a bioflocculant from *Paenibacillus* sp. AM49[J]. Biotechnology Letters, 2001, 23(15): 1229-1234
- [52] 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(6): 207-212
- [53] Sukenik A, Bilanovic D, Shelef G. Flocculation of microalgae in brackish and sea waters[J]. Biomass, 1988, 15(3): 187-199
- [54] 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
- [55] 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
- [56] Sukenik A, Shelef G. Algal autoflocculation-verification and proposed mechanism[J]. Biotechnology and Bioengineering, 1984, 26(2): 142-147
- [57] Salim S, Bosma R, Vermuë MH, et al. Harvesting of microalgae by bio-flocculation[J]. Journal of Applied Phycology, 2011, 23(5): 849-855
- [58] Schenk PM, Thomas-Hall SR, Stephens E, et al. Second generation biofuels: high-efficiency microalgae for biodiesel production[J]. Bioenergy Research, 2008, 1(1): 20-43
- [59] Salim S, Vermuë MH, Wijffels RH. Ratio between autoflocculating and target microalgae affects the energy-efficient harvesting by bio-flocculation[J]. Bioresource Technology, 2012, 118: 49-55
- [60] Salim S, Shi Z, Vermuë MH, et al. Effect of growth phase on harvesting characteristics, autoflocculation and lipid content of *Ettlia texensis* for microalgal biodiesel production[J]. Bioresource Technology, 2013, 138: 214-221