

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.02.006

# 蓝藻无害化资源化处置和利用研究现状与进展

谭嘉怡<sup>1</sup>, 王秉政<sup>1</sup>, 王燕<sup>1</sup>, 王硕<sup>1,2,3</sup>, 李激<sup>1,2,3</sup>

(1. 江南大学 环境与生态学院, 江苏 无锡 214122; 2. 江苏省厌氧生物技术重点实验室, 江苏 无锡 214122; 3. 江苏高校水处理技术与材料协同创新中心, 江苏 苏州 215009)

**摘要:** 富营养化引起的蓝藻水华暴发已经成为我国突出的水环境问题,现有对打捞蓝藻的处理处置方法主要包括干化焚烧、填埋、堆肥和沼气发电等,但是这些方法成本较高、资源化利用率低、二次污染严重,不符合新时期环境保护理念。蓝藻含有蛋白质和多糖(蓝藻淀粉、纤维素)等有机质,营养成分丰富,具有很好的开发利用前景。对蓝藻进行资源化利用,不仅能够缓解蓝藻的处理处置压力,也能实现变废为宝、变害为利的多重效益。综述了近年来国内外利用蓝藻制备生物燃料、提取藻蓝蛋白和制备有机碳源的研究现状及应用中存在的问题,可为构建蓝藻资源化利用新途径提供参考,助力实现碳减排与碳中和目标。

**关键词:** 蓝藻; 资源化利用; 生物燃料; 藻蓝蛋白; 有机碳源; 水体富营养化

**中图分类号:** TU99 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)02-0038-09

## Current Status and Advances of Harmless Disposal and Utilization of Cyanobacteria

TAN Jia-yi<sup>1</sup>, WANG Bing-zheng<sup>1</sup>, WANG Yan<sup>1</sup>, WANG Shuo<sup>1,2,3</sup>, LI Ji<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Environment & Ecology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Anaerobic Biotechnology, Wuxi 214122, China; 3. Jiangsu College of Water Treatment Technology and Material Collaborative Innovation Center, Suzhou 215009, China)

**Abstract:** The outbreak of cyanobacteria bloom caused by eutrophication has become a significant water environmental challenge in our country. Current disposal methods for salvaged cyanobacteria include dry incineration, landfill, composting, and biogas power generation. However, these methods are associated with high costs, low resource utilization rates, and serious secondary pollution. These approaches are increasingly incompatible with modern environmental protection principles. Cyanobacteria are rich in organic matter and nutrients, such as protein and polysaccharides (cyanobacteria starch, cellulose), offering significant potential for resourceful utilization. Exploiting these resources can not only alleviate the burden of cyanobacteria treatment but also transform waste into valuable products. This paper summarizes the current research progress on the safe disposal and resourceful utilization of cyanobacteria, focusing on applications such as biofuel production, phycocyanin

基金项目: 江南大学基本科研计划青年基金资助项目(JUSRP121057); 江苏省“双创博士”人才项目(JSSCBS20210834); 江苏省碳达峰碳中和科技创新专项资金资助项目(BE2022303); 江苏水处理技术与材料协同创新中心预研课题(XTCXSZ2020-2); 无锡市城镇污水处理厂提标改造深度处理技术研究和科技示范项目(N20191003)

通信作者: 王秉政 E-mail: b.wang@jiangnan.edu.cn; 李激 E-mail: lij@jiangnan.edu.cn

extraction, and organic carbon source manufacturing. These approaches can provide innovative strategies for cyanobacteria management while contributing to carbon emission reduction and carbon neutrality goals.

**Key words:** cyanobacteria; resourceful utilization; biofuel; phycocyanin; organic carbon source; water eutrophication

蓝藻对地球表面的大气从无氧变为有氧起到了巨大的作用,它也是最原始、最简单的一类光合放氧生物,如鱼腥藻等还可以直接固定大气中的氮。但是工业生产的高速发展,使得大量的工业废水和生活污水排入湖泊、河流等缓流水体中,造成水体富营养化过程进一步加深,蓝藻大面积暴发。暴发的蓝藻不仅会大量消耗水体中的余氧,使水体生物因缺氧而死亡,还可能释放出藻毒素,导致水体质量下降,从而引发饮用水安全问题。直接将蓝藻打捞出水面是降低水体富营养化程度最直接且最安全的应急治理措施。然而,如何对打捞后的蓝藻进行无害且高效的资源化处置与利用一直是各国学者研究探讨的焦点。

从蓝藻的生产现状及其特性出发,综述近年来关于蓝藻无害化资源化利用和处置的研究现状,并总结和探讨其利用与处置中存在的问题,以期为我国水华蓝藻资源化利用发展提供参考。

1 蓝藻的产生和处置现状及其特性

根据 2021 年《中国生态环境状况公报》公布的数据,在全国开展营养状态检测的 209 个重要湖泊(水库)中仍有 27.3% 的湖泊存在富营养化问题,其中滇池、太湖、巢湖的蓝藻水华规模位居前三<sup>[1]</sup>。2013 年—2020 年,太湖无锡地区打捞的蓝藻共计 920×10<sup>4</sup> t(含水率约为 90%)<sup>[2]</sup>。并且,蓝藻打捞要求不断提高,打捞能力也随之增长,预计蓝藻打捞量在今后一段时间内仍将持续增长。2013 年—2020 年无锡市太湖蓝藻打捞量变化见图 1。

目前,对于打捞后的巨量蓝藻,太湖无锡地区主要采用焚烧发电的形式处置,而太湖全域通过资源化利用方式处置藻泥的比例仅占 20% 左右<sup>[2]</sup>,包括藻泥沼气发电、沤肥返田等(见表 1)。并且,蓝藻的处置成本现已达到上千元每吨,在蓝藻打捞处置的高峰期,仅无锡市区藻泥干化焚烧发电项目的日运行成本就达到 100 万元以上。此外,填埋、沤肥返田等方式对环境影响大,二次污染严重,难以符合

新时期环境保护理念。在兼顾经济效益和环境效益的条件下,如何更有效地处置或利用打捞出的巨量蓝藻是一个亟待解决的问题。

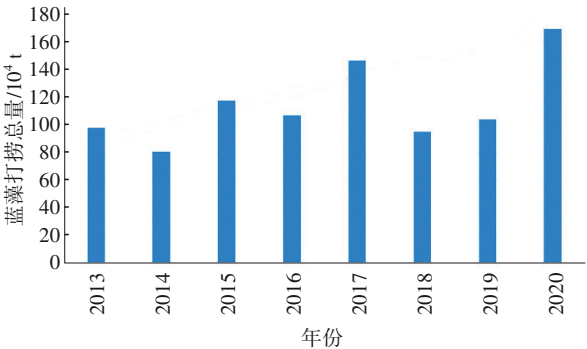


图 1 2013 年—2020 年无锡市太湖蓝藻打捞量变化

Fig.1 Changes of the amount of cyanobacteria harvested in Taihu Lake, Wuxi from 2013 to 2020

表 1 环太湖各市藻泥无害化处置、资源化利用能力统计  
Tab.1 Statistics on the capacity of harmless disposal and utilization of algae-sludge matter around Taihu Lake

项目	投运时间	处理能力(藻泥含水率约为 90%)/(t·d <sup>-1</sup> )	处理方式
无锡市藻泥干化焚烧发电项目	2019 年	1 000	无害化处置
宜兴市藻泥干化焚烧发电项目	2019 年	150	无害化处置
常州市武进区农业废弃物利用项目	2009 年	50	资源化利用
宜兴市有机废弃物综合处置项目	2018 年	100	资源化利用
宜兴市藻泥生产有机肥项目	2018 年	100	资源化利用

李克朗<sup>[3]</sup>曾对无锡市太湖蓝藻进行分析,发现蓝藻是一种富含蛋白和多糖的生物物质资源,其中粗蛋白占干质量的比例为 40.45%,藻多糖为 5%,粗脂肪为 0.26%,灰分为 9.6%,资源化利用前景广阔。目前,关于蓝藻资源化利用处理研究的方向主要有制备生物燃料、提取高附加值资源(如藻蓝蛋白)、制备新型生物物质碳源等。

## 2 蓝藻无害化资源化利用研究现状

### 2.1 制备生物燃料

以藻类为原料转化生产的乙醇被称为第三代燃料乙醇<sup>[4]</sup>,对比以甘蔗、玉米等经济作物为原料的第一代燃料乙醇,或是以稻壳、秸秆为原料的第二代燃料乙醇,蓝藻具有原料丰富、污染小、利用率高、生产成本低且生长不受土地和水资源的限制等优势。

#### 2.1.1 制备生物油

蓝藻能够将CO<sub>2</sub>和水转化为富碳脂质,这种脂质可作为生物柴油的基质。目前,国内外主要通过热化学转化途径以藻类为原料制备生物油。藻类生物质由于水分含量较高,因而非常适合通过液化反应制取生物油。Minowa等<sup>[5]</sup>在573 K、10 MPa条件下对盐藻直接液化,其反应中生物油的产率达到37%(基于有机质),热值为36 MJ/kg。徐珊等<sup>[6]</sup>进行了蓝藻和松木热解液化制取生物油的试验研究,发现当温度升高到500℃时,蓝藻的产油率和热值均高于松木,含氧量低于松木,而高热值、低含氧量有益于提高生物油品质。

热裂解也是由生物质生产生物油的技术,但是由于蓝藻含有大量的蛋白质,热裂解所得的生物油中氮含量较高,不能直接用作燃料油。为解决生物质的热解效率不高、生物油品质低等问题,研究者们提出加入催化剂或者其他物质(如煤、污泥、聚合物等)以促进共裂解效率提升。张俊<sup>[7]</sup>对蓝藻进行常压热裂解反应,发现当镁铝复合金属氧化物的添加量为蓝藻的3/4时,所得的生物油产率较不添加时上升了19%,并且生物油的热值也由25.91 MJ/kg提高至29.80 MJ/kg。

#### 2.1.2 制备生物乙醇

以玉米、甘蔗等农作物为原料生产的生物乙醇是目前燃料乙醇的主要来源,属于第一代生物燃料,其生产技术与工艺已经相对成熟,但同时也造成了粮食供应量下降、粮食资源匮乏的问题。第二代生物燃料的原料采用麦秆等农林废弃物,经预处理、酶降解和糖化、发酵等步骤制得,原材料廉价易得且储量大,但实际操作过程中存在原料难以存储、运输以及水解成本较高等问题,并且致密的木质纤维素生物质结构需要经过物理、化学等高生产成本的热预处理,才能方便进行下一步的酵母乙醇

发酵<sup>[8]</sup>。

藻类脂肪含量较高,可在其细胞中积累大量油脂,以蓝藻为第三代生物乙醇的原料受到了越来越多的关注。目前,绝大多数研究主要采用人工培养的微藻,旨在培养过程中增加脂类和糖类的积累量。直接利用打捞上岸的水华蓝藻能够节省人工培养过程中产生的成本<sup>[9]</sup>。然而,野外蓝藻与人工培养的藻类相比,其脂类和糖类含量都相对较低。如从太湖打捞出来的蓝藻脂类含量低于1%,糖类含量低于10%<sup>[3]</sup>,直接将其作为生产生物燃料的原料可行性不高,所以目前有研究提出将打捞后的蓝藻通过再培养以提升其糖含量和生物可利用性,增加生物乙醇产率,简化工艺流程。

陈雪初等<sup>[9]</sup>将打捞收集后的水华蓝藻接种到光生物反应器中进行再培养(见图2),通过在再培养阶段调节氮磷比、投加光合作用促进剂和代谢干扰剂以调控光合作用和糖代谢过程,而由蓝藻生产的生物乙醇浓度由0.85 g/L升至6.52 g/L,产率由2.8%升至21.7%。刘思路等<sup>[10]</sup>将微囊藻在限氮条件下进行曝气培养以促进其碳水化合物的积累,最终得到的生物乙醇浓度达到8.32 g/L,该方法实现了蓝藻生产生物乙醇的可能性,有效减少了培养成本。

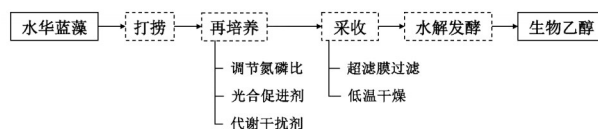


图2 一种以水华蓝藻为原料制备生物乙醇的方法与流程  
Fig.2 Method and process for preparing bio-ethanol from cyanobacteria

此外,蓝藻具有结构简单、生长快速、遗传操作便捷的特点,易于基因工程改造<sup>[11]</sup>。早在2009年就有学者提出通过基因工程改造蓝藻的概念:将具备生产乙醇的基因移植到蓝藻的细胞体内,使得蓝藻能够通过光合作用吸收二氧化碳,从而直接产生乙醇。高恶斌等<sup>[12]</sup>通过在蓝藻基因组不同位点引入乙醇脱氢酶基因和丙酮酸脱羧酶基因,使得蓝藻乙醇产量提高至5.5 g/L,彰显了基因工程改造蓝藻生产生物乙醇的可行性。

#### 2.1.3 应用过程中存在的问题

① 藻类通过热化学转化途径制备的生物油存在氮氧含量高、热值低、酸值高、稳定性较差等缺



点,其应用范围较窄;燃烧过程中还会产生污染空气的氮氧化物等产物,需经再处理后才能燃烧利用,并且热化学液化反应装置较为复杂,使其运行费用较高<sup>[7]</sup>。

② 蓝藻的组成与木质纤维素类生物质大不相同,其热裂解过程较为复杂,且热裂解的过程和机理尚不明晰。

③ 直接利用打捞上岸的水华蓝藻生产生物质乙醇虽然能够节省微藻培养过程中生物量增加阶段,缩短了藻源性糖的生产周期,但是其中的关键控制参数有待研究。

④ 蓝藻基因工程生产生物乙醇在工业级生产工艺和条件下,面临远比实验室环境更严苛的物理、化学、生物等因素的胁迫,并且报道的蓝藻中乙醇的实际产量仍远低于理论产量,且效率也不理想<sup>[11]</sup>。

据估算,我国藻类制备生物柴油经济成本可达到4.2~5.9万元/t<sup>[13]</sup>。利用蓝藻制备生物燃料的研究应着眼于以下两个方面:①探索高效的再培育蓝藻方法,以提高其脂质含量;②进一步开发藻类制备高价值生物油工艺,提高生物油产率和品质,增加生物油的附加价值,为大规模商业化生产奠定基础。

## 2.2 提取纯化藻蓝蛋白

蓝藻中的藻蓝蛋白颜色鲜艳,营养丰富,是自然界中罕见的色素蛋白之一,含量达5%以上。蓝藻中的必需氨基酸含量高,氨基酸组成齐全,可见,从蓝藻中获得高纯度的藻蓝蛋白既能消除蓝藻对环境的污染,又能产生可观的经济效益。

### 2.2.1 藻蓝蛋白的提取与纯化

藻胆蛋白可分为藻蓝蛋白、别藻蓝蛋白和藻红蛋白3类,其含量可达细胞干质量的10%~20%。其中,藻蓝蛋白(见图3)已广泛应用于多个领域,可作为天然着色剂应用于食品,作为营养补充剂应用于保健品,也可作为添加剂应用于化妆品等美妆美容产业,可以被制成消炎剂、抗氧化剂等应用于医药行业。

此外,藻蓝蛋白由于对荧光试剂的高度敏感性,还可作为抗体和受体的标记用于免疫标记实验<sup>[14]</sup>。根据纯度,藻蓝蛋白可分为食品级( $P>0.7$ )、试剂级( $0.7<P<3.9$ )和分析级( $P>4.0$ )等多种规格。藻蓝蛋白产品市场价值大,前景广阔,有数据显示

藻蓝蛋白的年消费量(国际市场)为500 t左右,销售额已超过6亿元,研发成熟、经济的提纯技术是获得高纯度藻蓝蛋白的关键。

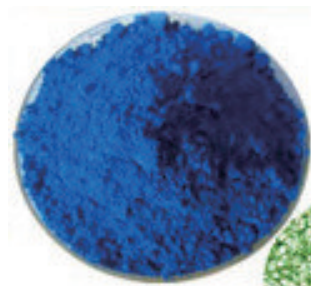


图3 藻蓝蛋白

Fig.3 Phycocyanin

藻蓝蛋白的提取纯化可以分为三个阶段<sup>[15]</sup>:①细胞破碎。破碎蓝藻细胞的细胞壁和细胞膜,使蛋白质溶出。②蛋白粗提取。蛋白质溶出后进行粗提取,在沉淀提取过程中保持蛋白的活性。③分离纯化。蛋白粗提液中成分众多,既包括多糖、蛋白质、矿物盐等,还包括叶绿素、维生素、 $\gamma$ -亚麻酸等成分。并且,粗提液中的藻蓝蛋白需纯化到一定纯度方可满足不同的需求。

细胞破碎是提取藻蓝蛋白的关键第一步,常用方法包括冻融法、超声波破碎法、溶胀法、化学试剂法等<sup>[16]</sup>。Hadiyanto等<sup>[17]</sup>对藻蓝蛋白提取时所采用的超声波频率、时间、温度进行了优化,试验结果表明,在温度为52.5℃、超声频率为42 kHz、处理时间为42 min条件下,藻蓝蛋白的最佳产率可达15.7%。张静等<sup>[18]</sup>综合比较反复冻融法、超声波法、溶胀法和丙酮法对太湖蓝藻中藻蓝蛋白的提取,发现反复冻融法提取效果最佳,得到的藻蓝蛋白浓度最高可达3.1 mg/L。此外,也有研究将两种或多种方法联合使用,胡双飞<sup>[19]</sup>通过联合使用反复冻融法与超声法来提取螺旋藻藻胆蛋白,并优化温度、超声功率和时间条件,最终藻蓝蛋白的提取率可达45.76%。

在确定细胞破碎方法的基础上,选取最合适的提取剂进行蛋白粗提取。庞晓宇等<sup>[20]</sup>采用液氮反复冻融法破碎蓝藻细胞后,进一步考察了Asolctin-CHAPS缓冲液(AC)、磷酸盐缓冲液和三羟甲基氨基甲烷-盐酸缓冲液对蛋白的提取效果。比较分析发现,磷酸盐缓冲液对蛋白的提取浓度为2.62 mg/L,虽然AC缓冲液对蛋白的提取浓度达到了3.83 mg/L,

但其成本昂贵且制备复杂,综合考虑处理成本与提取效果,磷酸盐缓冲液更适用于藻蓝蛋白的粗提取。

在第三阶段分离纯化过程中,常用的藻蓝蛋白纯化方法有膜过滤法、盐析沉淀法、柱层析法和双水相萃取法等<sup>[15]</sup>。Garcia-Lopez等<sup>[21]</sup>将藻蓝蛋白的粗提液先用0.2 μm微滤膜过滤,再用10 ku超滤膜过滤,蛋白纯度由2.65提升至3.72。杨莹<sup>[22]</sup>采用硫酸铵盐析沉淀藻蓝蛋白,然后用自由流电泳(温度14℃,电压500 V,样品流速200 μL/min)进行纯化,蛋白纯度由2.19提升至4.60。李辉东<sup>[23]</sup>通过冻融破壁、絮凝沉淀、两步盐析、透析和双水相萃取等流程对太湖蓝藻进行实验室小规模提取和纯化,并对其中的耗费进行估算,得出纯度为4.60的藻蓝蛋白成本约1 929.55元/g,而现在试剂级别的藻蓝蛋白市售价高达15美元/mg。

在我国,利用螺旋藻制备藻蓝蛋白的产业化技术和应用发展较快且日臻成熟。例如,在内蒙古自治区的鄂托克旗,截至2020年底其螺旋藻产业园区的藻粉产量达到4 000 t/a,占全国总产量的50%以上和全球总产量的35%以上,藻蓝蛋白粉产量70余吨,成为全球主要的螺旋藻粉和藻蓝蛋白粉出口基地。

### 2.2.2 应用过程中存在的问题

根据相关统计,纯化阶段的费用占到藻蓝蛋白生产成本的50%~90%<sup>[24]</sup>,提取纯化藻蓝蛋白的高成本也是制约其开发利用的瓶颈,实现藻蓝高附加值资源化利用的关键是研发经济高效的藻蓝蛋白提取纯化技术。因此,为实现藻蓝蛋白的工业化生产与大面积应用,必须有更为高效、经济且规模化的分离纯化工艺。目前,虽然已有诸多研究探索了藻蓝蛋白的提取纯化,但仍存在以下问题有待进一步解决:

① 在常用的细胞破碎方法中,超声波破碎法产生的高温会引起藻蓝蛋白变性,溶胀法提取周期较长,化学试剂法会产生污染,反复冻融法破碎蓝藻细胞操作虽易实现且难被污染,人为干扰也最小<sup>[18]</sup>,但其规模化生产时间较长。

② 传统的盐析沉淀法、膜过滤法等藻蓝蛋白的分离纯化步骤中较为常用,但在实际工业化生产过程中存在操作步骤复杂、动力能耗高及操作周期长等缺点<sup>[15]</sup>。双水相萃取法虽然可以有效分离

藻蓝蛋白和杂质,但是整个萃取体系容易乳化,不易控制,并且双水相物料的成本高昂,限制了该方法在工业生产中的应用<sup>[24]</sup>。另外,藻蓝蛋白中新引入的杂质也对后续分离造成了困难。

③ 提取后的藻蓝蛋白应用于食品中的稳定性和安全性仍有待深入研究。

### 2.3 制备有机碳源

蓝藻通过厌氧发酵产生的挥发性脂肪酸(VFAs,如乙酸、丙酸、丁酸等)可以用作污水处理厂的优质碳源。蓝藻细胞经过破壁处理后,水分和有机质会被释放,固液分离后得到富含小分子有机物和氨氮的澄清液体可直接作为污水处理工艺所需的碳源使用,也可以经过精制(氨氮吹脱、氨氮汽提、膜分离等)后得到纯度更高的碳源供给污水处理工艺使用,而含水率较低的藻泥饼可作为种植所需的营养土以及制备磷肥的原料。利用蓝藻制备碳源是符合当下污水处理厂碳减排思路的一个新研究点。

#### 2.3.1 直接制备有机碳源

蓝藻细胞由肽聚糖及纤维素构成的双层细胞壁包裹,细胞壁外往往包有黏性多糖组成的胶鞘。由于其独特的细胞结构导致一些破壁技术很难将蓝藻细胞破碎完全,细胞内部的结构蛋白和多糖等营养物质难以溶出,使得有机物在厌氧发酵产酸过程中利用率低,产酸率受限。因此,需要高效的破壁技术促进胞内有机质的溶出以实现蓝藻有机质的高效利用。

目前,超声波破壁、热碱水解、反复冻融技术等都是常用的藻类破壁技术。Cho等<sup>[25]</sup>采用热碱预处理方式处理蓝藻,发现热碱预处理后的可溶性蛋白浓度比对照组高出1.81倍。余甜甜等<sup>[26]</sup>采用高压均质法对蓝藻进行破壁处理和厌氧发酵试验,同时与热碱预处理后的蓝藻进行对比,发现高压均质法处理的蓝藻产酸率最高为0.32 g/g,而热碱处理的产酸率为0.24 g/g。热碱预处理操作简便、破壁效率及有机质释放率高,成本较高压均质法低,是蓝藻破壁预处理较为适宜的方法。

此外,为强化蓝藻中有机物的生物降解和转化,近年来多通过向厌氧发酵体系投加外源添加剂来促进水解和酸化。外源添加剂主要包括金属及金属氧化物、碳基材料以及一些表面活性剂等,其能促进厌氧微生物的生长繁殖,激活参与水解酸化



关键酶的活性,提高产酸效率并相应增加工艺过程的稳定性。陈韵致<sup>[27]</sup>发现将不同浓度的粉末活性炭添加进入蓝藻厌氧发酵体系中,能够不同程度地促进蓝藻发酵产酸量,加快产酸速率,且当活性炭添加浓度为0.5 g/L时促进效果最明显,4 d时的产酸量最高达到4 875 mgCOD/L。王敏等<sup>[28]</sup>分别向发酵体系中添加Fe、Fe<sup>2+</sup>、Ni<sup>2+</sup>和酵母浸膏4种营养物质来强化产氢产酸效果,当酵母浸膏添加浓度为0.25 g/L时,蓝藻发酵的产酸效果最佳,丁酸和总有机酸产量分别可达到6 803和9 269 mg/L,比空白组分别提高164%和105%。

以蓝藻为原料制备的生物质碳源VFAs浓度高,可生化性好,可直接作为污水处理的反硝化碳源,但目前相关的研究较少。李子阳等<sup>[29]</sup>先将蓝藻通过热碱预处理破碎细胞,再进行厌氧发酵产酸,回收氮磷后的蓝藻发酵液可直接作为生活污水反硝化脱氮的碳源(见图4)。结果发现,以蓝藻发酵液为外源碳源的反硝化效果好于传统商业碳源(乙醇、乙酸钠),硝态氮的去除率达到99.13%,反硝化速率为1.98 mg/(gMLSS·h)。有研究<sup>[26]</sup>将100 t(含固率8%)的蓝藻藻渣(干基有机质含量为60%)在220℃、3.5 MPa条件下氧化反应1 h,得到氧化液94.9 t,其COD为19 960 mg/L、氨氮为1 240 mg/L, B/C>0.7,可生化性好,适合作为污水处理的碳源使用,并且氧化液经过氨氮吹脱技术处理后,氨氮含量降低至130 mg/L,可作为纯度更高的碳源供给污水处理工艺使用。

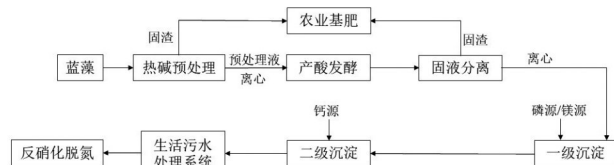


图4 蓝藻热碱预处理-厌氧发酵产酸工艺流程

Fig.4 Flow chart of VFAs production of cyanobacteria by thermos-alkaline pretreatment and anaerobic fermentation

### 2.3.2 与其他碳源混合制备复合碳源

蓝藻制备生物质碳源应用研究的另一种方式是与其它碳源混合使用制备复合碳源。具体操作步骤是将蓝藻分别经过浮选分离、压滤、破壁、高压压榨后再进入水解发酵罐进行酸化发酵,得到含有有机酸和氮磷等营养物质的蓝藻发酵液,然后将蓝藻发酵液和其他碳源一起搅拌混合得到生物复合

碳源(见图5)。研究发现,当蓝藻发酵液、粗甘油和水配比如分别为38%、42%和20%时,反硝化效果最好,对硝态氮的去除率达到96.75%,出水COD由原来的200 mg/L降至35 mg/L。该制备方式所用的原料为蓝藻和粗甘油,成本低廉、安全有效且来源丰富,制备过程中也无需大型设备,投资成本小,运行费用低。

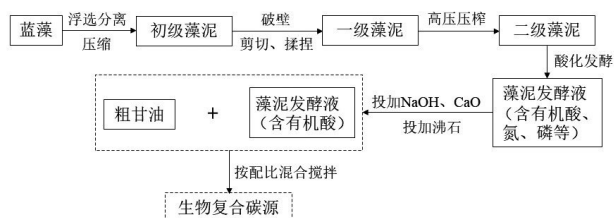


图5 一种利用蓝藻制备生物复合碳源的方法

Fig.5 Manufacturing method for a composite biological carbon source utilizing cyanobacteria

### 2.3.3 应用过程中存在的问题

① 蓝藻独特的细胞结构使得发酵过程中微生物可利用的溶解态有机质含量低,产酸效率不高,需要高效的破壁处理方法以促进其应用。热碱预处理作为常用的藻类破壁方法具有操作简单、破壁效率及有机质释放率高等优势,但其处理时间长,加热导致的气体蒸发还具有恶臭,会产生二次污染<sup>[26]</sup>。

② 蓝藻中有机质的相关提取制备关键技术尚不成熟也不完整,蓝藻厌氧发酵产酸过程会释放NH<sub>4</sub><sup>+</sup>和PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>,需要对其进行去除回收后再用作城市污水处理厂脱氮除磷的投加碳源。

③ 蓝藻生物质碳源的特征参数、实际投加过程的工艺参数和投加控制关键参数尚不明晰,投加后对活性污泥性能和微生物菌群的影响也有待进一步探究。

我国污水处理厂常用传统化工碳源成本高<sup>[30]</sup>,不符合“双碳”背景下能源使用理念,生物质碳源也存在着反硝化速率低的问题(见表2)。蓝藻生物质碳源来源广泛,生物降解性能好,将其作为外加碳源用于生物反硝化过程,不仅能提升脱氮效果,也为生物质废弃物资源化利用提供了有效的路径,选择合适的工艺提高蓝藻发酵液自身的可生化性,降低发酵液中氮和磷的含量,或寻找其他高效碳源相混合制备复合碳源将是蓝藻为原料制备反硝化碳源应用研究的主要方向。

表2 现有外加碳源与蓝藻碳源的种类、优缺点、应用现状与运行成本

Tab.2 Types, advantages, disadvantages, application status and operation cost of external carbon sources and cyanobacteria-based carbon source

碳源类型	常见物质	优点	缺点	应用现状	COD 当量价格/(元·kg <sup>-1</sup> )
低分子有机物	甲醇	成本低,易被微生物分解利用	生物毒性,安全性能差,污泥自适应能力差	基本被取代	20
	乙酸	分子质量小,易被微生物分解利用,无毒性	运输不便,投加量难以控制	正在被取代	42.27
	乙酸钠	反硝化速率高,污泥驯化期短,运输方便	成本高,投加量大,调控难	大量实际应用	85.47
糖类	葡萄糖	成本低,易被微生物分解利用,运输方便	反硝化速率低,亚硝酸盐累积,易堵塞	实际应用广泛	30.92
生物质碳源	稻壳、花生壳等农业废弃物和园林凋落物	可作为生物膜载体,废物资源化,投加可控性强	分解利用率低,水力停留时间长,反硝化速率低	已有大量研究	45.71
污泥水解液	有机物和 VFAs	污泥资源化利用,亚硝酸盐无明显积累	需要对氮、磷进行回收,工艺条件需进一步研究	目前研究重点	暂无计算
垃圾渗滤液	有机物和 VFAs	反硝化速率高,降低脱氮成本,废物利用	含有金属离子和有毒物质,预处理成本高	有一定的研究	暂无计算
蓝藻发酵液	有机物和 VFAs	蓝藻资源化利用, VFAs 浓度高,可生化性好	蓝藻打捞效率低、浓缩和脱水难、破壁难、氮磷去除难,实际投加过程的工艺参数有待研究	目前研究重点	暂无计算

3 总结与展望

大规模发展、利用可再生能源是实现“双碳”目标的重要突破点。将蓝藻用作生物质能源原料,既能缓解化石等不可再生资源紧张的压力,又可减缓将土地用于粮食还是用作生物燃料生产之间的潜在冲突。

目前,蓝藻资源化利用处理研究的方向主要有制备生物燃料、提取高附加值资源(如藻蓝蛋白)和制备污水处理有机碳源等,但是蓝藻的脂质含量极低,需要再培养以提升其糖含量和生物可利用性,并且蓝藻热裂解所得的生物油品质低,反应装置复杂,运行费用较高。利用蓝藻提取藻蓝蛋白其产品附加值高、市场前景广阔,但缺乏成熟、经济的提纯技术,难以实现藻蓝蛋白的工业化生产。以蓝藻为原料制备生物质碳源,有助于低成本解决污水处理厂生物脱氮工艺中的碳源不足问题,构建了“以废治废”的蓝藻资源化利用新途径,但是目前蓝藻产酸率低,提取制备生物质碳源关键技术尚不成熟,以及蓝藻生物质碳源的特征参数、实际投加过程主要工艺参数和控制关键参数尚不明晰,对活性污泥性能和微生物菌群的影响仍有待探究。

由于藻毒素对人体健康和生态环境的潜在危

害,其也是蓝藻资源化应用的障碍之一。去除水中藻毒素的方法主要有物理法(活性炭吸附)、化学降解(如臭氧、高铁酸盐、紫外线等)以及微生物降解等。此外,也有研究发现藻毒素在厌氧状态下的降解速度远大于自然存放的降解速度。因此在进行资源化利用之前,应先将蓝藻进行相应预处理,以确保蓝藻资源化利用的安全。目前,蓝藻资源化技术开发和应用仍是研究的热点,用于实际工程还应在技术研发、成本控制、风险防控等方面进一步研究。

参考文献:

[ 1 ] JIA C H, YIN J Z, GEORGE B, *et al.* The magnitude and drivers of harmful algal blooms in China’s lakes and reservoirs: a national-scale characterization [J]. *Water Research*, 2020, 181:115902.

[ 2 ] 殷鹏, 张建华, 胡晓雨. 太湖蓝藻水华和湖泛应急防控能力提升对策研究 [J]. *水资源开发与管理*, 2022, 8(1): 18-22.

YIN Peng, ZHANG Jianhua, HU Xiaoyu. Study on countermeasures to enhance emergency prevention and control ability of cyanobacteria bloom and lake flooding in Taihu Lake [J]. *Water Resources Development and Management*, 2022, 8(1): 18-22 (in Chinese).

- [3] 李克朗. 太湖蓝藻资源化利用可行性研究[D]. 无锡: 江南大学, 2009.  
LI Kelang, The Feasibility of the Use of Blue Aglae in Taihu Lake [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2009 (in Chinese).
- [4] 曹运齐, 刘云云, 胡南江, 等. 燃料乙醇的发展现状分析及前景展望[J]. 生物技术通报, 2019, 35(4): 163-169.  
CAO Yunqi, LIU Yunyun, HU Nanjiang, *et al.* Current status and prospects of fuel ethanol production [J]. Biotechnology Bulletin, 2019, 35 (4): 163-169 (in Chinese).
- [5] MINOWA T, YOKOYAMA S, KISHIMOTO M, *et al.* Oil production from algal cells of *Dunaliella tertiolecta* by direct thermochemical liquefaction [J]. Fuel, 1995, 74(12): 1735-1738.
- [6] 徐珊, 王晶博, 陆阿定, 等. 蓝藻和松木热解液化制取生物油的试验研究[J]. 可再生能源, 2014, 32(9): 1371-1378.  
XU Shan, WANG Jingbo, LU Ading, *et al.* Experimental research on preparation of bio-oil by cyanobacteria and pine pyrolysis liquefaction [J]. Renewable Energy Resources, 2014, 32 (9): 1371-1378 (in Chinese).
- [7] 张俊. 太湖蓝藻催化裂解的研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.  
ZHANG Jun. The Research of Catalytic Pyrolysis of Cyanobacteria in Taihu Lake [D]. Nanjing: Southeast University, 2015 (in Chinese).
- [8] 周卫征. 富碳微藻转化燃料乙醇关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.  
ZHOU Weizheng. Research on the Conversion of Carbohydrate-rich Microalgal Biomass for Fuel Ethanol [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018 (in Chinese).
- [9] 陈雪初, 黄莹莹, 刘思路, 等. 一种以水华蓝藻为原料制备生物乙醇的方法: CN201811617124.9 [P]. 2019-04-16.  
CHEN Xuechu, HUANG Yingying, LIU Silu, *et al.* The Invention Relates to a Method for Preparing Bioethanol from Cyanobacteria Bloom; CN201811617124.9 [P]. 2019-04-16 (in Chinese).
- [10] 刘思路, 黄莹莹, 陆金忠, 等. 以微囊藻为原料制备生物乙醇的试验研究[J]. 环境科学与技术, 2020(9): 8-13.  
LIU Silu, HUANG Yingying, LU Jinzhong, *et al.* Study on bioethanol production from microcystis [J]. Environmental Science & Technology, 2020(9): 8-13 (in Chinese).
- [11] 栾国栋, 吕雪峰. 蓝藻光驱固碳合成乙醇技术的发展回顾和未来展望[J]. 生物产业技术, 2018(4): 68-73.  
LUAN Guodong, LÜ Xuefeng. Review and prospect on development of cyanobacteria based photosynthetic ethanol production [J]. Biotechnology & Business, 2018 (4): 68-73 (in Chinese).
- [12] 高恶斌, 朱杨杰, 叶鹏林. 一种生物合成乙醇的构建体, 菌株以及生产乙醇的方法: CN113403333A [P]. 2021-09-17.  
GAO Ebin, ZHU Yangjie, YE Penglin. A Construct for Biosynthetic Ethanol, a Strain, and a Method for Producing Ethanol; CN113403333A [P]. 2021-09-17 (in Chinese).
- [13] 杨艳丽. 基于开放池培养的微藻生物柴油经济成本分析[J]. 太阳能学报, 2015, 36(2): 295-304.  
YANG Yanli. Economic cost analysis of biodiesel from microalgae cultivated in open pond [J]. Acta Energeiae Solaris Sinica, 2015, 36(2): 295-304 (in Chinese).
- [14] MOGANY T, KUMARI S, SWALHA F M, *et al.* Extraction and characterisation of analytical grade C-phycocyanin from *Ehhalotheca sp.* [J]. Journal of Applied Phycology, 2019, 31(3): 1661-1674.
- [15] 张杜炎, 宋佳玉, 石敏, 等. 藻蓝蛋白纯化的研究进展[J]. 广东化工, 2015, 42(10): 70-71.  
ZHANG Duyan, SONG Jiayu, SHI Min, *et al.* Progress of phycocyanin purification [J]. Guangdong Chemical Industry, 2015, 42(10): 70-71 (in Chinese).
- [16] 任顺成, 曹悦, 李林政, 等. 天然食用色素藻蓝蛋白研究进展[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(7): 203-208.  
REN Shuncheng, CAO Yue, LI Linzheng, *et al.* Research progress of natural food pigment phycocyanin [J]. Food Research and Development, 2021, 42(7): 203-208 (in Chinese).
- [17] HADIYANTO H, SUTTRISNORHADI S. Response surface optimization of ultrasound assisted extraction (UAE) of phycocyanin from microalgae *Spirulina platensis* [J]. Emirates Journal of Food and Agriculture, 2016, 28(4): 227.
- [18] 张静, 韦玉春, 王国祥, 等. 太湖蓝藻水样中藻蓝蛋白提取方法比较[J]. 湖泊科学, 2013, 25(2): 283-288.  
ZHANG Jing, WEI Yuchun, WANG Guoxiang, *et al.*



- Comparison of extraction methods for phycocyanin from cyanobacteria blooms water samples in Taihu Lake [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2013, 25(2): 283–288 (in Chinese).
- [19] 胡双飞. 超声耦合亚临界水提取螺旋藻活性多肽及降血糖活性研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2018.  
HU Shuangfei. Ultrasound-assisted Subcritical Water Extraction of Peptides from *Spirulina platensis* and Their Hypoglycemic Activities [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018 (in Chinese).
- [20] 庞晓宇, 段洪涛, 张玉超, 等. 富营养化湖泊水体中藻蓝蛋白提取方法的对比 [J]. *湖泊科学*, 2014, 26(5): 799–806.  
PANG Xiaoyu, DUAN Hongtao, ZHANG Yuchao, *et al.* Comparison of the extraction methods of phycocyanin pigments in eutrophic lake waters [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, 26(5): 799–806 (in Chinese).
- [21] GARCIA-LOPEZ D A, OLGUIN E J, GONZALEZ-PORTELA R E, *et al.* A novel two-phase bioprocess for the production of *Arthrospira (Spirulina) maxima* LJGR1 at pilot plant scale during different seasons and for phycocyanin induction under controlled conditions [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 298: 122548.
- [22] 杨莹. 自由电泳快速分离纯化藻蓝蛋白的方法学研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2016.  
YANG Ying. Methodological Research about Fast Separation and Purification of Phycocyanin via Free Flow Electrophoresis [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016 (in Chinese).
- [23] 李辉东. 太湖蓝藻藻蓝蛋白提取纯化工艺研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2012.  
LI Huidong. Study on Extraction and Purification Technology of C-yanprotein from Taihu Lake Blue Algae [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2012 (in Chinese).
- [24] 冯维希, 岳岑, 黄文. 双水相技术分离纯化藻胆蛋白的研究进展 [J]. *食品研究与开发*, 2010, 31(12): 246–249.  
FENG Weixi, YUE Cen, HUANG Wen. Research progress on aqueous two phase extraction for purification of phycobiliprotein [J]. *Food Research and Development*, 2010, 31(12): 246–249 (in Chinese).
- [25] CHO H U, KIM Y M, PARK J M. Changes in microbial communities during volatile fatty acid production from cyanobacterial biomass harvested from a cyanobacterial bloom in a river [J]. *Chemosphere*, 2018, 202: 306–311.
- [26] 余甜甜, 王率率, 张杰, 等. 高压均质对蓝藻有机质释放与厌氧发酵产酸的促进效果 [J]. *环境科学研究*, 2020, 33(1): 155–162.  
YU Tiantian, WANG Shuaishuai, ZHANG Jie, *et al.* Enhanced cyanobacteria organic release and anaerobic fermentation for VFAs production by high-pressure homogenization [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(1): 155–162 (in Chinese).
- [27] 陈韵致. 促进蓝藻厌氧发酵生产短链脂肪酸的策略研究 [D]. 上海: 同济大学, 2018.  
CHEN Yunzhi. Study on Strategies to Promote the Production of Short-chain Fatty Acid by Anaerobic Fermentation of Cyanobacteria [D]. Shanghai: Tongji University, 2018 (in Chinese).
- [28] 王敏, 廖家林, 黄振兴, 等. 功能性营养物质对蓝藻厌氧发酵产酸的强化作用 [J]. *食品与生物技术学报*, 2012, 31(4): 379–384.  
WANG Min, LIAO Jialin, HUANG Zhenxing, *et al.* Effects of functional nutrition additions on organic acids production from blue-green algae fermentation [J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2012, 31(4): 379–384 (in Chinese).
- [29] 李子阳, 陆东亮, 华天予, 等. 蓝藻发酵液中氮磷回收及其作为反硝化碳源研究 [J]. *环境化学*, 2020, 39(12): 3562–3573.  
LI Ziyang, LU Dongliang, HUA Tianyu, *et al.* Recovery of nitrogen and phosphorus from fermentation liquid of cyanobacteria and its application as a carbon source for denitrification [J]. *Environmental Chemistry*, 2020, 39(12): 3562–3573 (in Chinese).
- [30] 熊子康, 郑怀礼, 尚娟芳, 等. 污水反硝化脱氮工艺中外加碳源研究进展 [J]. *土木与环境工程学报*, 2021, 43(2): 168–181.  
XIONG Zikang, ZHENG Huaili, SHANG Juanfang, *et al.* State-of-the art review of adding extra carbon sources to denitrification of wastewater treatment [J]. *Journal of Civil and Environment Engineering*, 2021, 43(2): 168–181 (in Chinese).

作者简介: 谭嘉怡(1999–), 女, 江苏无锡人, 在读硕士, 主要研究方向为废物资源化工程。

E-mail: 6211405018@stu.jiangnan.edu.cn

收稿日期: 2022-10-06

修回日期: 2023-01-30

(编辑: 丁彩娟)