

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.12.003

## 蓝藻制备生物质碳源现状和难点

李羽志<sup>1</sup>, 李爱民<sup>1</sup>, 郝家厚<sup>1</sup>, 谭嘉怡<sup>1</sup>, 王 燕<sup>1</sup>, 王秉政<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:** 污水处理厂去除氮磷污染物时往往需要投加外碳源,而现有外碳源来自石油类物质的生物炼制过程而导致成本较高,同时,为了满足“碳减排”与“碳中和”的战略需求,亟须开发新型碳源以代替现有碳源。蓝藻作为一种农业剩余物,含有丰富的有机质,在制备碳源方面具有较大潜力。简述了目前蓝藻制备生物质碳源的两类方法:厌氧消化法和物理化学法,主要介绍了利用蓝藻制备生物质碳源的难点,包括蓝藻脱水与浓缩,以及脱氮除磷和藻毒素的去除,同时归纳了可能的解决方法。最后结合已有蓝藻生物质碳源的研究,针对蓝藻生物质碳源可能存在的藻毒素抑制反硝化菌的问题,对解决措施(在蓝藻制备生物质碳源阶段采用酸水解工艺去除藻毒素,在投加蓝藻生物质碳源阶段逐步驯化耐受藻毒素的反硝化菌以高效去除总氮)进行了展望。

**关键词:** 生物质碳源; 蓝藻; 脱氮除磷; 细胞破壁; 藻毒素

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)12-0018-08

## Current Status and Challenges of Cyanobacteria in Preparing Biomass Carbon Sources

LI Yu-zhi<sup>1</sup>, LI Ai-min<sup>1</sup>, HAO Jia-hou<sup>1</sup>, TAN Jia-yi<sup>1</sup>, WANG Yan<sup>1</sup>,  
WANG Bing-zheng<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, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;  
3. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Water Treatment Technology & Material, Suzhou 215009, China)

**Abstract:** The removal of nitrogen and phosphorus pollutants in wastewater treatment plants (WWTPs) often requires the addition of external carbon sources, while the existing external carbon sources are derived from the biorefinery process of petroleum substances, resulting in high costs. In order to meet the strategic demand for carbon emission reduction and carbon neutralization, it is urgent to develop new carbon sources to replace the existing carbon sources. As an agricultural residue, cyanobacteria are rich in organic matter and have great potential for preparing carbon sources. In this paper, two methods for preparing biomass carbon source using cyanobacteria are briefly introduced: anaerobic digestion and physical-chemical methods. The difficulties in preparing biomass carbon sources

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3207602)

通信作者: 李激 E-mail: lij@jiangnan.edu.cn

using cyanobacteria are clarified, including the water removal for thickening, and the removal of nitrogen, phosphorus, and microcystins in cyanobacteria. Possible solutions to these difficulties are further summarized. Finally, combined with the existing research of cyanobacteria biomass carbon sources, the paper provides an outlook on current strategies to address the issue of potential inhibition of denitrifying bacteria by microcystins. These measures include: ① employing an acid hydrolysis process to remove microcystins during preparation stage of cyanobacterial biomass carbon sources; ② gradually domesticating denitrifying bacteria tolerant to microcystins during the dosing phase of cyanobacterial biomass carbon sources to achieve efficient total nitrogen removal.

**Key words:** biomass carbon sources; cyanobacteria; nitrogen and phosphorus removal; cell wall cracking; microcystic toxins

我国制定的污水处理排放标准日益提高,特别是对污水排放中总氮指标的控制愈加严格。污水处理厂脱氮常采用异养反硝化技术,其核心是电子传递和碳源消耗,即硝酸盐与有机碳的氧化还原反应<sup>[1]</sup>,碳源成为生物脱氮工艺的重要因素<sup>[2-3]</sup>。常用工业碳源有甲醇、乙酸钠、葡萄糖等,但存在成本高、稳定性差、不可持续性的缺点<sup>[4]</sup>。随着污水脱氮要求的提高,通过发酵糖类和农林废弃物生产无毒无害的生物质碳源是一种具有可持续意义的模式,其终产物主要成分是小分子有机酸、醇类和糖类<sup>[5]</sup>。采取上述模式不仅可以减少石油炼制乙酸和乙酸钠过程产生的碳排放,还可以发挥废弃物循环利用的特征而满足“碳中和”的目标需求。

蓝藻中的有机质含量较高,将其制备成生物质碳源,作为污水处理厂的投加碳源具有可行性。分析了蓝藻制备生物质碳源的潜力,总结了现有蓝藻制备生物质碳源的特征,并对蓝藻脱水、浓缩、破壁、脱氮除磷、藻毒素去除过程中可能存在的难点及解决方案进行论述,最后对蓝藻制备生物质碳源在污水处理厂中的投加策略提出建议。

## 1 蓝藻制备生物质碳源的潜力

在实际应用中,基于碳源释碳速度和形态的不同,生物质碳源有固态和液态两种,均利于处理低碳氮比废水中的硝酸盐污染。目前,液态碳源应用较多,具有接触时间短、接触面积大等优点。液态碳源通常包括有机质水解酸化产物(发酵液)和有机质热解产物(甘油)等。其中,废液发酵产物通常为小分子有机质,具有结构简单、使用方便的特点,且能溶解微量和常量元素,促进反硝化反应的发生。麦可碳(MicroC® 2000)是一种专门为污水处理

生化法去除氮磷污染物而开发的具有优质功能的外碳源产品,其主要成分源于农作物的甘油。采用麦可碳作为反硝化碳源,可将总氮和总磷去除率分别提升至80%和96.63%,同时在对活性污泥驯化一段时间后也能进一步提高活性污泥的反硝化潜力<sup>[6]</sup>。有研究将麦可碳利用到深床滤池中进行实际污水处理,发现投加麦可碳后可以大幅度强化活性污泥的反硝化性能,并且麦可碳中的大分子有机质向小分子有机质的转化会消耗部分氧气,同步改善缺氧池中的缺氧条件,降低氧气对反硝化过程的抑制作用<sup>[7]</sup>。

生物质固态碳源有利于解决液态碳源易投加过量的问题,而且在使用过程中能够作为微生物的附着载体,从而提高污水处理单元内的微生物密度,能够有效缩短反硝化脱氮处理单元的启动时间,提升处理单元的反硝化效率<sup>[8]</sup>。蓝藻生物质含有微量、常量元素及小分子有机酸,具有抗冲击能力好、绿色可持续、安全稳定,价格低廉等优点,其所含的丰富有机质是制备蓝藻碳源、提高污水处理反硝化微生物脱氮效果的物质基础。此外,蓝藻产量巨大,开发蓝藻生物质碳源不仅可以为城市污水处理厂提供补充碳源,还可以实现蓝藻的资源化利用。

## 2 蓝藻制备生物质碳源的研究进展

为了满足脱氮除磷的要求,污水处理中需补充碳源才能达到脱氮除磷所需的C/N比,以往污水处理厂投加碳源类型主要为化工类产品,如甲醇、乙酸钠、葡萄糖等,但使用过程中存在安全及运行成本增加等问题。因此需要开发更加低廉、有效的有机碳源。生物质原料先经过收集、运输和“可能”的

储存,然后通过适合的能源转换技术,最终实现满足能源需求的目的<sup>[9]</sup>。利用蓝藻提取生物质能源的转化技术可以分为热化学转化和生物化学转化两大类,而影响转化过程的主要因素包括藻类生物质原料的类型和数量、能源的期望形式和用途、经济成本、产物的最终形态。蓝藻生物质制备碳源可以通过厌氧消化产生,也可以通过物理化学法提取其中的有机质得到。

### 2.1 厌氧消化液制备有机碳源

蓝藻制备生物质碳源应用研究较少,目前以蓝藻厌氧消化液制备有机碳源为主,一般包含两种应用方式:①利用蓝藻厌氧消化液作为反硝化碳源,李子阳等<sup>[10]</sup>采用鸟粪石+磷酸钙沉淀法组合工艺回收蓝藻厌氧发酵产酸液中的氮和磷,纯化后的蓝藻发酵液作为外碳源,总氮优于《污(废)水处理用碳源》(T/CSTE 0001—2021)标准要求( $TN \leq 300 \text{ mg/L}$ )。②蓝藻厌氧消化液与其他碳源混合使用,钱盘生等<sup>[11]</sup>发明了一种利用蓝藻生物复合碳源的制备方法(见图1),该生物复合碳源由30%~38%的蓝藻发酵液、35%~42%的粗甘油混合而成,具有反硝化速率高、脱氮除磷效果好、安全性高、成本低的优点。

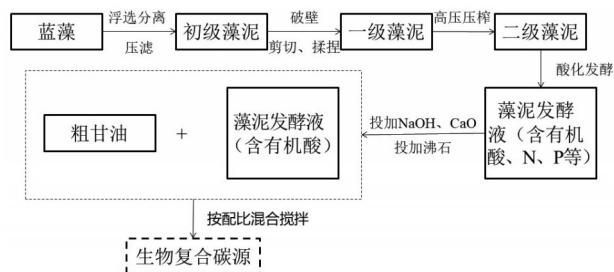


图1 蓝藻混合粗甘油制备生物复合碳源

Fig.1 Preparation of biological composite carbon source by cyanobacteria with crude glycerol

### 2.2 物理化学法制备有机碳源

高压均质法是一种能有效破碎蓝藻细胞,提取蓝藻中有机质和可溶性蛋白等物质的方法。袁志文等<sup>[12]</sup>发明了一种深度处理蓝藻等富营养化藻类并提取有机碳源的工艺,在高压高温状态下,氧气的氧化作用大大增强,可以实现藻类细胞的彻底破壁,使细胞内的水分和有机质释放出来,最终获得COD高达19 960 mg/L的蓝藻氧化液。该氧化液生化性较好,B/C比 $>0.7$ ,适合作为污水处理碳源使用。

甘油基生物质碳源已被证明是一种优质的外加污水处理碳源。蓝藻的油脂含量为16.6%,有研究将蓝藻以图2所示的流程制备生物柴油<sup>[13]</sup>,而甘油是油脂转化生物柴油过程中的副产物,因此蓝藻油脂的提取有望转化为优质生物质碳源。马其然等<sup>[14]</sup>提出使用水热液化方法以高效实现基于蓝藻的生物油制备。该过程可以促进复杂的生物质大分子降解并促进小分子重排、聚合成油脂化合物,且能最大限度地将除油脂以外的蛋白质和多糖组分也转化为高热值的生物油,从而达到较高的生物油转化率。通过该工艺得到的生物油主要成分为甲基、亚甲基类烷烃化合物与饱和脂肪酸酯,另外还有酮、羧酸、醇类、烯烃类化合物、含氮化合物等。蓝藻制备生物油作为外加碳源对污水处理厂反硝化潜力、功能微生物群落以及出水水质指标的影响仍有待探究。

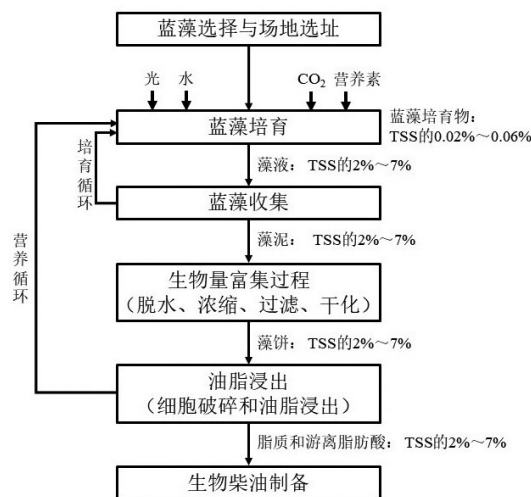


图2 蓝藻制备生物柴油流程

Fig.2 Biodiesel preparation process by cyanobacteria

## 3 蓝藻制备生物质碳源存在的问题与解决

蓝藻富含有机质且来源广泛,作为原材料制备生物质碳源有保障,既可实现蓝藻的资源化利用,又有助于实现“碳中和”与“碳减排”的目标。目前,利用蓝藻制备生物质碳源需要关注以下问题:

① 打捞的蓝藻含水率较高,在蓝藻资源化利用或处置时需要较高的运输成本和前处理成本,因此蓝藻的高效浓缩和脱水是其资源化利用前的技术难题。

② 蓝藻的刚性细胞壁会阻碍有机质从细胞中分离,应通过热化学工艺的选择和运行参数的优



化调控,实现有益终产物的提取和有害副产物的风险防控。

③ 微囊藻毒素能够抑制反硝化细菌的生长及其反硝化作用,并且随着浓度的增大,这种抑制效果愈加明显。在考虑资源化利用措施时,必须关注蓝藻碳源中藻毒素含量及制备工艺对藻毒素的去除效果。

④ 蓝藻生物质碳源中氮、磷含量高,有效去除氮和磷并保留含碳物质是关键技术问题,考虑经济成本和最终产物形态,研究各种适用技术方法和参数,并确保蓝藻生物质碳源符合污(废)水处理用碳源标准。

⑤ 为评估蓝藻生物质碳源的应用条件和功能价值,宜分析现有生物质碳源实际投加过程的主

要工艺参数和投加控制关键参数,确保在反硝化速率提升、微生物群落稳定方面发挥优势。

3.1 蓝藻浓缩和脱水

蓝藻资源化前处理一般包括高效打捞湖泊中的蓝藻以及高效浓缩蓝藻。人工或简单的机械打捞作业得到的蓝藻含水率较高(>98%),须进行脱水,但其本身的性质导致常规脱水技术很难达到脱水要求。打捞技术的升级将推进一体化高效蓝藻分离浓缩设备的研制。目前,蓝藻浓缩技术主要有化学混凝/絮凝、生物絮凝、重力沉降、气浮和电絮凝等方法,蓝藻脱水技术主要有膜过滤和离心脱水等方法<sup>[15]</sup>。在实际工程应用中,藻水分离站常采用“破壁-沉淀分离-气浮-脱水”组合工艺。这些方法各自的优缺点如表1所示。

表1 蓝藻浓缩和脱水技术的优缺点

Tab.1 Advantages and disadvantages of cyanobacteria thickening and dewatering technology

方法	优点	缺点
化学混凝/絮凝	简单快捷;无能源需求	化学药剂成本较高;对藻细胞可能有毒性危害
生物絮凝	成本较低;对蓝藻细胞无毒性	细胞组成发生变化;有微生物污染的可能性
重力沉降	操作简单;成本较低	处理时间较长;浓缩效果较差
气浮	适用于大规模浓缩;成本较低;占地面积小;运行时间短	通常需要投加化学药剂;对海洋微藻浓缩效率较低
电絮凝	适用于多种蓝藻处理;不需要投加化学药剂	能源和设备成本较高
膜过滤	高效率脱水;可用于剪切敏感类蓝藻	膜堵塞会影响脱水效率;膜清洗和更换会增加成本
离心脱水	高效率脱水;泥饼含藻量高;适用于大部分蓝藻种类	成本较高;能源需求较高;强剪切力可能会导致细胞损坏

3.2 蓝藻细胞破壁

蓝藻的刚性细胞壁阻碍了细胞中有机质的分离,使微生物可利用的底物减少,从而影响蓝藻厌氧发酵产酸的效率<sup>[16]</sup>。因此,强化蓝藻细胞破壁是提取有机质的重要一步。目前,蓝藻破壁的预处理方法主要有热碱处理、高压均质、酶解法、超声破碎等。热碱预处理可以极大促进蓝藻有机质释放到液相,在NaOH浓度为3%、78℃下处理5.6h时,蓝藻藻浆SCOD高达5446mg/L<sup>[17]</sup>。采用高压均质技术处理蓝藻可以提高细胞破壁效果,不同条件下高压均质蓝藻所释放的有机质较处理前均有所提高,SCOD可达22.74g/L,比对照组提高52.34倍<sup>[16]</sup>。使用超声波时,所需的特定能量输入取决于藻类细胞的物理特性(形状、大小和细胞内结构)。当丝状藻类 *Microspora* sp. 在输入能量为57MJ/kg的条件下,COD的总溶解度增加了60%<sup>[18]</sup>。Yin等<sup>[19]</sup>利用纤维素酶增强了小球藻细胞壁的降解,蛋白质、肽和糖的释放量分别提高25倍、6倍和8倍。同样,向

小球藻中添加纤维素酶以优化脂质提取,发现处理24h和72h后,酶解率分别为60%和85%<sup>[20]</sup>。对于蓝藻破壁预处理方法,热碱处理操作简单、成本低、破壁效率及有机质释放率高,具有广阔的应用前景。

3.3 蓝藻藻毒素

水华蓝藻中的部分种类为产毒藻类,如水华常见的微囊藻因其毒素产生的危害较大而受到广泛关注,微囊藻毒素在污水处理系统中会对功能微生物类群产生一定影响。低浓度微囊藻毒素(0.01、0.1mg/L)对反硝化细菌的影响较小,且随处理时间的延长反硝化细菌生长速度逐渐恢复。高浓度微囊藻毒素(1、5、10mg/L)将导致反硝化细菌死亡,且微囊藻毒素浓度越高,其抑制作用越明显<sup>[21]</sup>。此外,高浓度微囊藻毒素也能够显著抑制除磷细菌的生长,这种抑制作用主要通过降低细菌数量以及抑制磷酸酶活性实现。

目前,藻毒素的去除技术有臭氧氧化、活性炭

吸附、光降解与光催化氧化及水生生物处理等<sup>[22-23]</sup>, 其各自的优缺点见表2。蓝藻生物质碳源中藻毒素含量与制备工艺有关, 在蓝藻与盐酸酸料比为10:1的条件下, 藻毒素含量随酸解时间的延长而降低, 处理16 h后蓝藻酸解前干物质中的藻毒素从50 810

$\mu\text{g/kg}$ 降至0.98  $\mu\text{g/kg}$ , 去除率达99.998%<sup>[24]</sup>。虽然藻毒素性质稳定, 但经过酸热水解, 其环状结构可能遭到破坏, 故毒性降低<sup>[24]</sup>。综上, 蓝藻制备生物质碳源过程中, 需关注蓝藻生物质碳源中藻毒素含量及热化学工艺对藻毒素的去除效果。

表2 蓝藻脱毒技术的优缺点

Tab.2 Advantages and disadvantages of cyanobacterial detoxification technology

方法	优点	缺点
臭氧氧化	脱毒效率高; 适用于多种蓝藻	可能形成消毒副产物; 某些种类对pH有要求
活性炭吸附	操作简单、可实现自动化; 成本较低; 适用于大规模应用	因活性炭种类不同脱毒效率会产生差别
紫外线辐射	适用于多种蓝藻	成本较高; 不同藻毒素所需紫外线发射光谱不同
水生生物处理	占地面积小; 低能耗、可持续的绿色处理技术; 藻毒素可被水生植物完全吸收	要求定期种植和收割植物; 藻毒素可能会被释放回水体中

### 3.4 蓝藻生物质碳源的氮磷污染物

蓝藻是一种富含蛋白的生物质资源, 作为反硝化碳源会引入了新的氮磷污染物, 对污水处理厂脱氮除磷存在一定风险。目前已有学者开展了蓝藻制备有机碳源的研究<sup>[25-26]</sup>, 通过对蓝藻进行热碱处理, 可以提高可溶性蛋白的含量, 但对挥发性脂肪酸等有机化合物的产率提高效果较差。袁志文等<sup>[12]</sup>发明了一种深度处理蓝藻等富营养化藻类并提取有机碳源的工艺, 有机碳源中总氮含量为1 430 mg/L, 总磷含量为172 mg/L; 李子阳<sup>[27]</sup>发现蓝藻厌氧发酵液中总氮含量为2 821.1 mg/L, 总磷含量为62.77 mg/L。《污(废)水处理用碳源》(T/CSTE 0001—2021)要求复合碳源总氮 $\leq 300$  mg/L, 总磷 $\leq 60$  mg/L, 而目前蓝藻生物质碳源中的氮和磷含量远超该标准, 因此将其作为城市污水处理厂补充碳源时, 需优先对氮和磷进行回收。目前, 从废水中去除或回收氮的方法有Anammox生物处理法、反渗透法、汽提与酸吸收相结合的方法、沸石吸附法、膜工艺法、电化学处理法以及鸟粪石结晶法等<sup>[28-29]</sup>, 用于磷回收的技术有膜生物反应器、电渗析-结晶法、离子交换法、硅酸钙吸附法、生物吸附法以及鸟粪石结晶法<sup>[30-31]</sup>。在上述各种氮磷回收方法中鸟粪石结晶法备受青睐, 原因在于鸟粪石结晶法可以同时实现氮与磷的回收<sup>[32]</sup>。该技术反应迅速, 容易控制, 可实现同步脱除回收沼液中的氮和磷, 得到的鸟粪石产物作为高效缓释肥可用于农业生产, 有利于沼气工业及氮磷资源回收行业的可持续发展<sup>[33]</sup>。由于蓝藻发酵液中氮磷比例不平衡, 鸟粪石沉淀后还有大量磷存在, 需要进一步开展磷回收处理。磷酸

钙沉淀法是一种常用的除磷方法, 具有成本低、处理方便等优点, 且磷酸钙是磷矿石的主要成分, 回收的磷酸钙可直接用作磷酸盐的工业原料。

### 3.5 蓝藻生物质碳源应用策略

外碳源投加也存在不利影响, 对于污水生物脱氮系统, 大部分碳源将在缺氧区消耗完毕。然而, 仍有部分未完全反应的碳源流入好氧池, 导致好氧系统曝气能耗增加<sup>[34]</sup>。此外, 外碳源容易导致生物量增加, 而较高的生物量又会导致内源呼吸增加, 曝气量需求将进一步增大<sup>[35]</sup>。无论选择何种外碳源, 通常应满足以下要求: ①主要成分为可生物降解有机物, 生物处理残留物不得影响出水水质和污泥泥质; ②碳源中不得含有生物抑制剂或影响生物活性的物质, 长期投加不得造成明显的微生物种群结构变化, 停止投加碳源后的生物不适期应工程可控; ③具有较快的反硝化速率, 外加碳源在缺氧区反应彻底, 避免过量的污染物进入好氧区, 增加生物系统耗氧量。

蓝藻生物质碳源成分较为复杂, 对污水处理厂微生物群落的影响研究较少。通常生物质碳源的反硝化速率低于乙酸钠、甲醇等碳源, 这可能与生物质碳源中的有机成分有关<sup>[36]</sup>。蓝藻生物质碳源藻毒素浓度对微生物群落可能存在抑制作用, 可从以下两方面解决: ①选择蓝藻酸水解制备生物质碳源工艺, 获得碳源目标产物, 同时去除藻毒素; ②长期驯化反硝化细菌, 使其从高浓度藻毒素环境中慢慢适应并恢复。利用蓝藻生物质碳源作为异养反硝化的补充碳源具有环境效益和成本效益双重优势。蓝藻生物质碳源在溶解过程中释放的养分以

及微量元素可以提升反硝化速率,但这些元素如何影响微生物群落的功能,如何介导反硝化过程,以及某些元素对反硝化过程的刺激或抑制机制还需要进一步研究。此外,在污水处理中,蓝藻生物质碳源会提升浊度、DOC和氨氮浓度,该问题也亟待解决。蓝藻碳源的投加策略对污水处理厂功能微生物群落、出水指标的影响尚不清晰。在实际工程中使用蓝藻生物质碳源作为外加碳源时,碳源的时效性也是需要考虑的一个重要因素。最后蓝藻生物质碳源的pH及氧浓度都是影响工艺系统运行稳定性的重要因素。因此,应通过蓝藻碳源特性分析、投加策略优化、微生物种群功能分析,确定实际投加过程的主要工艺参数和投加控制关键参数,进而满足工艺系统连续运行的客观要求。

综上所述,针对蓝藻生物质碳源应用过程中可能存在的风险,首先应结合蓝藻生物质碳源前期实验结果,通过调整投加量和投加策略,减少副作用。此外,对蓝藻生物质碳源进行预处理和添加助剂,可以提高反应效率,稳定污染物去除效果,蓝藻生物质碳源与其他碳源组合可能有利于开发高效的硝酸盐污染物处理工艺。

#### 4 结论与展望

① 蓝藻生物质含有微量、常量元素及小分子有机酸,具有极大的制备生物质碳源的潜力。目前,蓝藻制备生物质碳源主要通过厌氧消化和物理化学法释放蓝藻中的有机质,并将大分子有机化合物转化成易于反硝化细菌利用的小分子有机化合物。

② 蓝藻资源化处理过程存在蓝藻打捞效率低、蓝藻浓缩和脱水难、藻毒素难以去除、细胞破壁困难、氮磷污染物浓度高和碳源投加策略不清晰等问题。蓝藻的浓缩、脱水常采用“破壁-沉淀分离-气浮-脱水”的组合工艺进行;对于蓝藻破壁预处理,常采用热化学处理法,其中加酸进行酸热水解可以有效去除藻毒素;蓝藻提取物中氮磷的去除可采用鸟粪石沉淀+磷酸钙沉淀技术,能够同时去除氮磷污染物。

③ 应用蓝藻生物质碳源时需先分析碳源成分特征,然后通过调整用量和投加方式,减少不利影响。对蓝藻生物质碳源进行预处理和添加助剂,以及长期驯化微生物群落,都可以提高反硝化效果。

#### 参考文献:

- [1] GU X, LENG J T, ZHU J T, *et al.* Influence mechanism of C/N ratio on heterotrophic nitrification-aerobic denitrification process [J]. *Bioresource Technology*, 2022, 343: 126116.
- [2] CHEN H W, HU X B, SONG W W, *et al.* Effect of pistachio shell as a carbon source to regulate C/N on simultaneous removal of nitrogen and phosphorus from wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2023, 367: 128234.
- [3] WEI Q, ZHANG J S, LUO F Z, *et al.* Molecular mechanisms through which different carbon sources affect denitrification by *Thauera linaloolentis*: electron generation, transfer, and competition [J]. *Environment International*, 2022, 170: 107598.
- [4] 张璐璐. 基于有机缓释碳源的反硝化生物滤池对污水深度脱氮效果研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2019.  
ZHANG Lulu. Study on the Effect of Denitrification Biofilter Based on Organic Slow-release Carbon Source on Advanced Denitrification of Sewage [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019 (in Chinese).
- [5] 梁曼丽, 袁维波, 敖冬, 等. 餐厨垃圾制备高性能反硝化碳源的厌氧发酵条件优化[J]. *环境卫生工程*, 2022, 30(5): 60-66.  
LIANG Manli, YUAN Weibo, AO Dong, *et al.* Optimization of anaerobic fermentation conditions for the preparation of high-performance denitrified carbon sources with food waste [J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2022, 30(5): 60-66 (in Chinese).
- [6] 彭志英. 农废复合碳源的脱氮除磷效果和微生物群落研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021.  
PENG Zhiying. Nutrient Removal Using Agricultural Waste as Carbon Source: Performance and Microbial Community [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021 (in Chinese).
- [7] 王燕, 李激, 支尧, 等. 新型生物质碳源强化脱氮效果及微生物菌群分析[J]. *环境工程*, 2022, 40(9): 63-68, 117.  
WANG Yan, LI Ji, ZHI Yao, *et al.* Denitrification enhancement effect and microbial flora analysis of new biomass carbon source [J]. *Environmental Engineering*, 2022, 40(9): 63-68, 117 (in Chinese).
- [8] JIANG J J, LIANG D H, HU Y Y. Solid slow-release carbon sources improve the simultaneous nitrification and denitrification processes in low carbon resource



- wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2022, 365: 128148.
- [9] 张璐,陈岩,肖佳楠,等. 废弃农林生物质及其改性材料去除水中磷酸盐研究进展[J]. *济南大学学报(自然科学版)*, 2022, 36(5): 541-548.
- ZHANG Lu, CHEN Yan, XIAO Jianan, *et al.* Research progress on phosphate removal from water by using waste agricultural and forestry biomass and its modified materials[J]. *Journal of University of Jinan(Science and Technology)*, 2022, 36(5): 541-548 (in Chinese).
- [10] 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).
- [11] 钱盘生,潘亚斌,徐梦思. 一种利用蓝藻的生物复合碳源及其制备方法: CN202110777080.1 [P]. 2021-10-01.
- QIAN Pansheng, PAN Yabin, XU Mengsi. A Biological Composite Carbon Source Using Cyanobacteria and Preparation Method: CN202110777080.1 [P]. 2021-10-01 (in Chinese).
- [12] 袁志文,陈栋,许波. 一种深度处理蓝藻等富营养化藻类并提取有机碳源的工艺: CN202010847401.6 [P]. 2020-12-18.
- YUAN Zhiwen, CHEN Dong, XU Bo. A Process for the Deep Treatment of Eutrophic Algae such as Cyanobacteria and Extraction of Organic Carbon Sources: CN202010847401.6 [P]. 2020-12-18 (in Chinese).
- [13] MATA T M, MARTINS A A, CAETANO N S. Microalgae for biodiesel production and other applications: a review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14(1): 217-232.
- [14] 马其然,郭洋,王树众,等. 蓝藻水热液化制取生物油过程优化研究[J]. *西安交通大学学报*, 2015, 49(3): 56-61.
- MA Qiran, GUO Yang, WANG Shuzhong, *et al.* Optimization of bio-oil production from hydrothermal liquefaction of cyanophyta[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2015, 49(3): 56-61 (in Chinese).
- [15] 叶元,杨文杰,郑志永,等. 蓝藻泥热压滤深度脱水耦合制备磁性生物炭的中试工艺[J]. *环境工程学报*, 2020, 14(11): 3162-3169.
- YE Yuan, YANG Wenjie, ZHENG Zhiyong, *et al.* Pilot-scale process for magnetic biochar preparation by deeply dewatered cyanobacteria sludge with coupled thermal pressure filtration [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2020, 14(11): 3162-3169 (in Chinese).
- [16] 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).
- [17] 刘刚,屠春宝,毕相东,等. 碱法热处理对蓝藻厌氧发酵生物转化及微囊藻毒素降解效果的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2016, 33(6): 547-553.
- LIU Gang, TU Chunbao, BI Xiangdong, *et al.* Effects of alkaline thermal pretreatment to cyanobacteria anaerobic digestion and microcystins degradation [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(6): 547-553 (in Chinese).
- [18] ALZATE M E, MUNOZ R, ROGALLA F, *et al.* Biochemical methane potential of microalgae: influence of substrate to inoculum ratio, biomass concentration and pretreatment [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 123: 488-494.
- [19] YIN L J, JIANG S T, PON S H, *et al.* Hydrolysis of *Chlorella* by *Cellulomonas* sp. YJ5 cellulases and its biofunctional properties [J]. *Journal of Food Science*, 2010, 75(9): H317-H323.
- [20] CHO H S, OH Y K, PARK S C, *et al.* Effects of enzymatic hydrolysis on lipid extraction from *Chlorella vulgaris* [J]. *Renewable Energy*, 2013, 54: 156-160.
- [21] 杨翠云. 微囊藻毒素对微生物的生理生态学效应 [D]. 武汉:中国科学院研究生院(水生生物研究所), 2007.
- YANG Cuiyun. Studies on the Ecophysiological Effects of Microcystins against Microbe [D]. Wuhan: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, 2007 (in Chinese).
- [22] 李晨阳,王佳忆,姜恒,等. 漂浮型 Ag 系/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/TiO<sub>2</sub> 可见光催化材料去除微囊藻毒素[J]. *环境科学与技术*, 2022, 45(5): 34-43.
- LI Chenyang, WANG Jiayi, JIANG Heng, *et al.* Removal of microcystins by floating silver-based/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/

- TiO<sub>2</sub> visible light catalytic materials [J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 45 (5): 34–43 (in Chinese).
- [23] 孙聚龙. 光/电化学氧化去除水中藻类及藻毒素的机理研究[D]. 长沙:湖南大学, 2020.  
SUN Julong. Removal and Mechanism of Microcystis Aeruginosa and Algae Toxin by Photo/Electrochemical Oxidation [D]. Changsha: Hunan University, 2020 (in Chinese).
- [24] 郭起金. 蓝藻水华酸解产物的饲用安全性及对肉鸡饲喂效果的研究[D]. 南京:南京农业大学, 2012.  
GUO Qijin. Study on Feeding Security and Feeding Value in Broiler of the Acid Leaching Product of the Blue Green Algae Bloom [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012 (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] CHO H U, KIM H G, KIM Y M, *et al.* Volatile fatty acid recovery by anaerobic fermentation from blue-green algae: effect of pretreatment [J]. *Bioresource Technology*, 2017, 244: 1433–1438.
- [27] 李子阳. 蓝藻厌氧发酵产酸及发酵液作为反硝化外加碳源研究[D]. 无锡:江南大学, 2020.  
LI Ziyang. Acid Production from Cyanobacteria by Anaerobic Fermentation and Its Application as Additional Carbon Source for Denitrification [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020 (in Chinese).
- [28] 陈勇, 张新龙, 陆继来, 等. 反渗透预涂膜强化处理废水中硝酸盐氮的研究 [J]. *环境科技*, 2015, 28(5): 12–15.  
CHEN Yong, ZHANG Xinlong, LU Jilai, *et al.* Study on enhanced treatment of wastewater containing high nitrate by pre-coating reverse osmosis membrane [J]. *Environmental Science and Technology*, 2015, 28(5): 12–15 (in Chinese).
- [29] HUANG H M, ZHANG P, ZHANG Z, *et al.* Simultaneous removal of ammonia nitrogen and recovery of phosphate from swine wastewater by struvite electrochemical precipitation and recycling technology [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 127: 302–310.
- [30] HE Q Y, TU T, YAN S P, *et al.* Relating water vapor transfer to ammonia recovery from biogas slurry by vacuum membrane distillation [J]. *Separation and Purification Technology*, 2018, 191: 182–191.
- [31] 吴晓云. 基于双极膜电渗析耦合镁-空气电池系统的废水氮磷高效回收及机制 [D]. 福州:福建师范大学, 2021.  
WU Xiaoyun. Mechanism and Efficiency of Nitrogen and Phosphorus Recover from Wastewater Based on Bipolar Membrane Electrodialysis Coupled Magnesium-Air Cell System [D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2021 (in Chinese).
- [32] YESIGAT A, WORKU A, MEKONNEN A, *et al.* Phosphorus recovery as K-struvite from a waste stream: a review of influencing factors, advantages, disadvantages and challenges [J]. *Environmental Research*, 2022, 214 (Part 3): 114086.
- [33] EHIMEN E A, HOLM-NIELSEN J, POULSEN M, *et al.* Influence of different pre-treatment routes on the anaerobic digestion of a filamentous algae [J]. *Renewable Energy*, 2013, 50: 476–480.
- [34] 刘益荣, 蒋腾飞. 连续流分段进水生物脱氮的工艺控制要点和优化 [J]. *清洗世界*, 2022, 38(1): 33–34, 136.  
LIU Yirong, JIANG Tengfei. Control points and optimization of biological nitrogen removal process with continuous flow step-feed [J]. *Clean the World*, 2022, 38(1): 33–34, 136 (in Chinese).
- [35] 祁佳. 酱香型白酒废水 COD 组分表征及治理工艺优化 [D]. 武汉:武汉工程大学, 2022.  
QI Quan. Characterization of COD Components in Maotai-flavor Liquor Wastewater and Optimization of Treatment Process [D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2022 (in Chinese).
- [36] WANG H S, CHEN N, FENG C P, *et al.* Synchronous microbial V(V) reduction and denitrification using corn straw as the sole carbon source [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 839: 156343.

作者简介: 李羽志(1997–), 男, 安徽芜湖人, 硕士研究生, 主要研究方向为有机废弃物资源化。

E-mail: liyuzhi17826265892@163.com

收稿日期: 2022-12-27

修回日期: 2023-02-14

(编辑: 丁彩娟)