

# 四尾栅藻处理白酒酿造废水底锅水的研究

罗玉婷<sup>1</sup>, 张煜亮<sup>2</sup>, 税梁扬<sup>2</sup>, 刘根侨<sup>1</sup>, 王川<sup>1\*</sup>

(1. 四川轻化工大学, 四川 宜宾 644000; 2. 泸南酒业有限公司, 四川 泸州 646000)

**摘要:**以四尾栅藻(*Scenedesmus quadricauda*)为材料, 酿酒废水底锅水为培养基, 探究栅藻对底锅水总磷、总氮、COD的去除情况, 并对栅藻的成分进行分析。结果表明, 在底锅水 pH 为 6.0、质量分数为 5%、四尾栅藻接种量为 10%、光照强度为 8 000 Lux 时, 培养 6 d 后 COD 降解率达到 96.21%, 总氮降低率为 71.6%, 总磷降低率为 94.11%, 培养液中藻生物量、油脂、碳水化合物含量均高于 BG11 标准培养基。该研究可为酿酒废水处理 and 微藻养殖的耦合提供实验基础。

**关键词:**四尾栅藻; 底锅水; COD; 最适条件

中图分类号: X703.1

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2024)02-0206-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.02.037

## Treatment of pot bottom wastewater from liquor-making by *Scenedesmus quadricauda*

LUO Yu-ting<sup>1</sup>, ZHANG Yu-liang<sup>2</sup>, SHUI Liang-yang<sup>2</sup>, LIU Gen-qiao<sup>1</sup>, WANG Chuan<sup>1\*</sup>

(1. Sichuan University of Science & Engineering, Yibin 644000, China; 2. Lunan Liquor Industry Co., Ltd., Luzhou 646000, China)

**Abstract:** Using *Scenedesmus quadricauda* as the material and pot bottom wastewater from liquor-making as the culture medium to investigate the removal of total phosphorus, total nitrogen, and COD, and analyze the composition of *S. quadricauda*. The results show that the degradation rate of COD reaches 96.21%, total nitrogen decreases by 71.6%, and total phosphorus declines by 94.11% after 6 days of cultivation when pH is 6.0, pot bottom wastewater concentration is 5%, inoculation amount of *S. quadricauda* is 10%, and light intensity is 8 000 Lux. The contents of algal biomass, oil grease, and carbohydrates in the cultivation solution are all higher than those in the BG11 standard medium. This study can provide an experimental basis for the coupling of liquor-making wastewater treatment and microalgae cultivation.

**Key words:** *Scenedesmus quadricauda*; pot bottom wastewater; COD; optimum conditions

近年来我国白酒经济的迅猛发展带来了严重的环境问题, 白酒企业在生产过程中会产生大量称为底锅水的废水, 底锅水是经过蒸馏后留在锅底带有料醅的淋浆、酒尾、残糟、黄水等的混合水浆。底锅水属于高浓度酸性有机废水, COD 质量浓度较高, pH 一般在 2.8~3.2 之间<sup>[1]</sup>, 是白酒废水 COD、氮磷等污染物的主要来源之一。对白酒废水的处理过程主要包括过滤、重力沉淀、厌氧降解、催化氧化等方法<sup>[2]</sup>, 目前还存在成本高、周期长、效果不佳等问题, 因此, 寻求低成本、周期短的处理方法是白酒废水处理的发展趋势。

利用微藻处理工业废水具有显著的优点, 微藻在合适温度和光照等条件下可以利用废水中的营养物质生长, 从而可高效去除废水中氮、磷等污染物, 降低废水 COD。微藻在净化废水的同时还可以积累生物量, 收获的微藻可以进一步制备生物燃料、高附加值产品如饲料、肥料等<sup>[3]</sup>。将微藻养殖和废水

处理相耦合, 不但可以净化废水, 同时也降低了生产微藻的成本。目前微藻用于处理食品、化工、生化污水已有研究, 但对于白酒行业的底锅水的处理还未见报道, 因此, 笔者在前期工作中发现栅藻处理底锅水的效果优于小球藻和莱茵衣藻, 因此, 进一步探究了栅藻处理底锅水的最佳条件以及栅藻的成分, 以期对白酒底锅水的有效治理提供新的途径。

## 1 材料与试剂

### 1.1 材料

#### 1.1.1 试验藻株

选用的四尾栅藻(*Scenedesmus quadricauda* FACHB-44)购自中国科学院淡水藻种库。采用平板划线法将四尾栅藻藻液接种于 BG-11 固体培养基上, 在光照培养箱中于(25±2)℃、4 000 Lux 条件下培养至长出单菌落, 挑取栅藻单菌落接入 BG-11 液体培养基中并置于光照摇床扩大培养, 在 pH 为

收稿日期: 2023-10-19; 修回日期: 2023-12-01

基金项目: 泸州科技局项目(2021-SYF-45); 四川轻化工大学科研创新团队计划资助(SUSE652B003)

作者简介: 罗玉婷(1997-), 女, 硕士生, 研究方向为生物技术与工程, 993025870@qq.com; 王川(1970-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为微生物学, 通讯联系人, watpc57944@163.com。

7.0、(25±2)℃、光强 4 000 Lux、转速 130 r/min 条件下光暗交替(12 h/12 h)培养至初始细胞密度为 1×10<sup>5</sup> cells/mL,获得栅藻种子液。将种子液按照体积分数 10%接入 BG-11 液体培养基,测定波长为 680 nm 下的吸光度,绘制生长曲线。

### 1.1.2 酿酒废水底锅水

酿酒废水底锅水取自四川泸州泸南酒业有限公司。底锅水水质指标如表 1 所示。将底锅水以 5 000 r/min 离心 10 min,去除较大的不溶性颗粒固体。离心后的底锅水以高压灭菌杀死其中微生物,排除其对栅藻生长的影响,灭菌底锅水稀释后调节 pH 直接作为栅藻培养基。

表 1 底锅水水质指标

| 总氮 TN/<br>(mg·L <sup>-1</sup> ) | 总磷 TP/<br>(mg·L <sup>-1</sup> ) | COD/<br>(mg·L <sup>-1</sup> ) | pH        |
|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|-----------|
| 2692.23±2.89                    | 2928.17±1.68                    | 132000.00±11.70               | 3.41±0.04 |

## 1.2 主要试剂及仪器设备

BG-11 培养基:硝酸钠(1.5 g/L)、磷酸氢二钾(0.04 g/L)、硫酸镁(0.075 g/L)、氯化钙(0.036 g/L)、柠檬酸(0.006 g/L)、柠檬酸铁(0.006 g/L)、乙二胺四乙酸二钠(0.001 g/L)、碳酸钠(0.02 g/L)、A5(1 mL/L); A5: 硼酸(2.86 mg/L)、氯化锰(1.86 mg/L)、硫酸锌(0.22 mg/L)、钼酸钠(0.021 mg/L)和硫酸铜(0.08 mg/L)。

主要仪器设备:YCW-300AGZ 卧式光照摇床,上海捷呈实验仪器有限公司生产;QHX350 II 智能型光照培养箱,上海树立仪器仪表有限公司生产;YB02181805043 紫外-可见分光光度计、PHS-3CpH 计,上海佑科仪器仪表有限公司生产;多功能智能消解仪、GL-900 多参数水质分析仪,山东格林凯瑞精密仪器有限公司生产;K1160 全自动凯氏定氮仪、SOX606 脂肪测定仪,山东海能未来技术集团股份有限公司生产。

## 2 实验方法

### 2.1 底锅水培养栅藻工艺参数的确定

将指数期的四尾栅藻种子液按一定的比例接入一定 pH 和浓度的底锅水中,在(25±2)℃、转速 130 r/min 条件下光暗交替培养一定时间后测定底锅水 COD 值。设置底锅水不同 pH 为 6.0、6.5、7.0、7.5、8.0,质量分数为 3%~13%,栅藻接种量为 5%、10%、15%、20%,以及光照强度为 4 000、6 000、8 000、10 000、12 000 Lux,以 COD 为指标,每隔 2 d

取样测定,所有实验至少重复 3 次,确定底锅水培养栅藻的工艺条件。

### 2.2 底锅水 COD、总氮、总磷的测定

在最佳条件下以底锅水培养栅藻,每隔 2 d 定时取 10 mL 藻液,以 5 000 r/min 离心 10 min,取上清液用多功能智能消解仪消解后,用多参数水质分析仪测定其 COD、总氮、总磷。所有实验至少重复 3 次。

### 2.3 栅藻成分分析

将栅藻培养液以 5 000 r/min 离心 10 min 获取藻泥,用纯水清洗 3 次,在 40℃ 下烘干 8 h 后获得藻粉,栅藻生物量按文献[4]中所述的方法进行测定,蛋白质采用凯氏定氮法进行测定<sup>[5]</sup>,碳水化合物采取苯酚-硫酸法<sup>[5]</sup>,脂质采取索氏抽提法进行测定<sup>[6]</sup>。所有实验至少重复 3 次。

## 3 结果与分析

### 3.1 四尾栅藻的生长

栅藻在卧式光照摇床中于 BG-11 培养基培养下的生长曲线如图 1 所示。从图 1 中可以看出,在 BG-11 培养基培养条件下,四尾栅藻经历了 1~3 d 的延滞期后进入了 4~8 d 的快速生长的指数生长期,并在第 8 d 时进入平稳期。栅藻的指数期通常在 4~6 d<sup>[7]</sup>和 2~4 d<sup>[8]</sup>,与上述研究一致,是一个较适宜的处理工业废水的微藻。

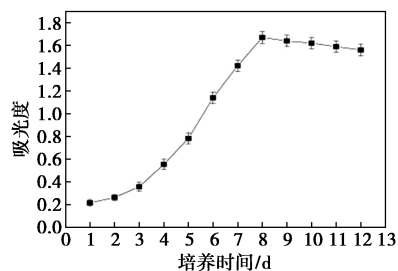


图 1 栅藻在 BG11 培养基中的生长曲线

### 3.2 底锅水培养栅藻条件优化

#### 3.2.1 底锅水 pH 的优化

底锅水属于酸性有机废水,其 pH 不适合栅藻生长,因此需要首先对底锅水 pH 进行调节。底锅水 pH 对栅藻生长的影响如表 2 所示。从表 2 中可以看出,栅藻在 pH 6.0~8.0 范围时生长较好,该 pH 范围外均不适合栅藻生长。栅藻在中性偏酸性或中性偏碱性的环境下去除 COD 的效果较好,在 pH 为 6.0 时底锅水 COD 去除率为 86.14%,而 pH 为 8.0 时的 COD 去除率为 86.10%。在 pH 中性环境下,栅藻对废水的处理能力有所下降。pH 对栅藻生长的影响主要体现在引起细胞膜电荷的变化,从而影

响微生物对营养物质的吸收。栅藻生长的 pH 范围通常在 6.0~7.9,因此栅藻处理废水通常需要调节废水 pH,如 Brar 等<sup>[5]</sup>调节乳品废水的初始 pH 为 6.5;Chong 等<sup>[9]</sup>调节工业废水的初始 pH 为 6.8~7.2;马艳芳等<sup>[10]</sup>将酒糟沼液的初始 pH 调节为 7.0;刘艳明等<sup>[11]</sup>将味精废水的初始 pH 调节为 6.82,以培养栅藻。本研究的结果有所不同,栅藻在 pH6 和 8 条件下均表现出较好的去除特性,Mandotra 等<sup>[12]</sup>培养栅藻时发现,当 pH 为 6 和 8 时,其栅藻的脂质和生物量最高,与该 pH 下营养物质的溶解或浓度有关,这些物质能促进栅藻的生长。栅藻有调控环境 pH 能力,能将溶液环境 pH 从酸性升高至碱性<sup>[13]</sup>,从这个角度考虑,调节底锅水初始 pH 为 6 时,能达到更好的效益。

表 2 栅藻在不同 pH 条件下对底锅水 COD 的去除率

| pH  | COD 去除率/%  | pH  | COD 去除率/%  |
|-----|------------|-----|------------|
| 6.0 | 86.14±1.51 | 7.5 | 84.13±1.00 |
| 6.5 | 80.25±1.73 | 8.0 | 86.10±1.40 |
| 7.0 | 80.57±1.01 |     |            |

### 3.2.2 底锅水浓度的优化

底锅水为高浓度有机废水,呈棕色,深色的底锅水会阻碍栅藻吸收环境光,从而降低了栅藻的生长和代谢,因此对底锅水的稀释是必要的。栅藻在不同底锅水质量分数下的 COD 的去除率如表 3 所示。从表 3 中可以看出,在质量分数为 3%~7% 范围内,栅藻可以明显降低底锅水中的 COD。当底锅水质量分数为 5% 时,栅藻对底锅水的 COD 去除率达到最高,为 90.15%。质量分数大于 5% 时,栅藻对底锅水 COD 的去除率有所降低。适宜的稀释度能够使栅藻有效的吸收环境光从而生长良好。另一方面,栅藻的生长还与水中的氮磷质量浓度和氮磷比有关<sup>[14]</sup>。在以往的文献中,栅藻对废水中氨氮(NH<sub>4</sub>-N)质量浓度有一定的适应范围,从 4.5 mg/L 的城市废水到 343 mg/L 的制革废水<sup>[15-16]</sup>,而随着磷质量浓度的增加,栅藻的生长也随之增加,对磷的去除率也迅速增加<sup>[17]</sup>。但不同的是,随着底锅水质量分数的增加,栅藻生长下降,这除了光吸收的影响外,可能还与氮磷比有关。在一些文献中,较大的氮磷比有助于废水的处理,如栅藻处理城市污水和猪场废水的最佳氮磷比分别为 18 和 64<sup>[18-19]</sup>,对于酿酒废水来说,氮磷比通常较低,如莱茵衣藻处理酿酒废水的最佳氮磷比为 2.45<sup>[20]</sup>,本研究中底锅水的氮磷比约为 1,这与酿酒废水的特性有关,对于较低的

氮磷比,低质量浓度的废水有利于氮磷的消耗。

表 3 栅藻在不同底锅水质量分数条件下的

### COD 的去除率

| 底锅水<br>质量分数/% | COD<br>去除率/% | 底锅水<br>质量分数/% | COD<br>去除率/% |
|---------------|--------------|---------------|--------------|
| 3             | 86.16±1.00   | 9             | 82.11±1.23   |
| 4             | 88.50±1.72   | 10            | 73.55±1.51   |
| 5             | 90.15±1.10   | 11            | 69.46±1.02   |
| 6             | 89.20±1.57   | 12            | 60.11±1.64   |
| 7             | 88.20±1.14   | 13            | 51.34±1.07   |
| 8             | 85.17±1.00   |               |              |

### 3.2.3 接种量的优化

接种量的大小决定于藻种生长繁殖的速度,接种量过大或者过小均会影响栅藻的培养。栅藻接种量对底锅水 COD 去除的影响如表 4 所示。从表 4 中可以看出,在 1%~10% 范围内,当接种量越高,栅藻去除底锅水中的 COD 效果越好,当接种量为 10% 时,COD 的去除率达到最大值,为 90.2%。;而当接种量大于 10% 后,COD 的降低率不增反降。产生这一现象是由于在低接种量下,栅藻的生长有足够的营养支持。当接种量过多,藻种生长过快,会造成溶氧不足,代谢废物增加,衰老细胞增加等,从而减缓对废水的 COD 降低。另一方面,在培养液中,高接种量下的藻液质量浓度达到一定程度后,会影响培养液的透光率,从而影响栅藻的代谢,减弱其去除 COD 的能力。这种接种量的饱和现象在别的文献中也观察到,当接种量增加到一定程度后,COD 的降低率趋于平稳<sup>[21]</sup>。栅藻在不同的废水处理中显示出不同的接种量,如栅藻处理沼液和市政污水培养栅藻时的接种量为 10%<sup>[22]</sup>;栅藻净化啤酒废水时的初始接种量设置为 20%<sup>[23]</sup>;而微藻处理高盐废水的接种量达到了 25%<sup>[10]</sup>,这与藻种和废水的特点有关。

表 4 不同栅藻接种量条件下底锅水 COD 去除率的变化

| 接种量/% | COD 去除率/%  | 接种量/% | COD 去除率/%  |
|-------|------------|-------|------------|
| 1     | 72.33±1.25 | 15    | 89.81±1.09 |
| 5     | 84.78±1.11 | 20    | 86.15±1.72 |
| 10    | 90.20±1.31 |       |            |

### 3.2.4 光照强度的优化

不同光照强度对栅藻生长影响如表 5 所示。从表 5 中可以看出,当光照强度低于 8 000 Lux 时,COD 的去除率随着光照强度的增强而升高;当光照强度为 8 000 Lux 时,栅藻对 COD 的降低率最高达到 96.21%;当光照强度高于 8 000 Lux 时,COD 去

除率逐渐降低。这是由于栅藻的生长需要合适的光照强度,光强太弱,栅藻的光合作用不够,会使栅藻生长缓慢,栅藻在 BG11 培养基中的光强通常为 4 000 Lux。本研究中由于采用的底锅水本身含有颜色,在光照强度为 8 000 Lux 时,由于较强的光照对栅藻细胞造成了损伤<sup>[24]</sup>,造成 COD 有所降低。

表 5 不同光照强度条件下底锅水 COD 去除率的变化

| 光照强度/Lux | COD 去除率/%  | 光照强度/Lux | COD 去除率/%  |
|----------|------------|----------|------------|
| 4000     | 90.22±1.50 | 10000    | 95.81±1.39 |
| 6000     | 93.12±1.53 | 12000    | 92.42±1.48 |
| 8000     | 96.21±1.00 |          |            |

### 3.3 底锅水指标成分分析

在底锅水质量分数为 5%、pH 为 6、接种量为 10%、光照强度为 8 000 Lux 的条件下,用栅藻处理的底锅水的成分变化情况如图 2 所示。从图 2 中可以看出,培养时间为 2~4 d 时,COD 降低最快;当培养时间为 6 d 时,COD 降低率最高,达到 96.21%;培养时间超过 6 d 后,COD 降低率减缓,这个培养时间大致与栅藻的生长曲线一致。栅藻对底锅水 TN 和 TP 的去除大致呈现相似的趋势。去除底锅水中的 TP 的速率在 4~10 d 时的去除率较高,并在第 6 d 时去除率达到最高,为 94.11%,而 TN 的去除速率在 4~6 d 内增长最快,且在第 6 d 时达到最高的 TN 去除率 71.6%。栅藻在培养过程中会增加培养液的 pH<sup>[13]</sup>,pH 升高的底锅水有助于栅藻的生长,这使得在培养前期栅藻对 COD、TP、TN 的去除效果增强。随着培养时间的延长,COD 的降低率减缓源于栅藻生长后期的衰亡造成 COD 增加。尽管如此,培养时间还与废水的特性有关。在一些栅藻处理废水的文献中,处理时间各有不同,如张晶<sup>[25]</sup>利用栅藻处理畜禽废水时第 4 d 的 COD 去除率达到最大值;杜学振等<sup>[26]</sup>用栅藻处理猪场废水时耗时 14 d, Ferreira 等<sup>[27]</sup>用栅藻处理啤酒厂废水的时间为 17 d。本研究中的培养时间与 Chen 等<sup>[28]</sup>利用栅藻

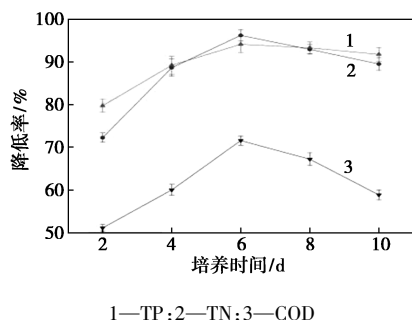


图 2 栅藻培养过程中底锅水成分的变化

处理城市废水的时间相近,少于大部分栅藻处理废水的时间,表明在此优化条件下,四尾栅藻可以有效处理底锅水。

### 3.4 栅藻成分分析

对以底锅水培养基和最佳培养条件下的栅藻进行成分分析,并以 BG11 标准培养基为对照,结果如表 6 所示。从表 6 中可以看出,以底锅水培养的四尾栅藻在生物量 (1.12 g/L)、脂质质量分数 (6.81%) 和碳水化合物质量分数 (8.37%) 等指标方面均超过了 BG11 培养基,仅在蛋白质质量分数方面逊于 BG11。表明栅藻在去除底锅水中营养物质的同时还可以积累一定的生物量,在营养成分方面也有一定的提高。在底锅水中生长的栅藻蛋白质质量分数较低,而生物量增高,这是由于底锅水中的 N/P 较低,栅藻的生长更优先于脂质和碳水化合物的积累,这与杨小峰等<sup>[29]</sup>研究的结果类似,较低的 N/P 所得到的生物量更高。对于蛋白质质量分数的进一步提高,可采用半连续培养、间歇补料等方式进行培养模式优化。在底锅水中培养的栅藻油脂质量分数高于 BG11 培养基,但比用猪场废水和水产市场废水培养的栅藻油脂质量分数低<sup>[15,30]</sup>,这是由于此时栅藻正处于生长对数期,而栅藻在营养缺乏的条件下才开始慢慢积累油脂<sup>[31]</sup>。这可通过优化底锅水氮磷比培养来积累栅藻油脂。

表 6 最佳培养条件下四尾栅藻成分分析

| 培养基  | w(蛋白质)/%   | w(脂质)/%   | w(碳水化合物)/% | 生物量/(g·L <sup>-1</sup> ) |
|------|------------|-----------|------------|--------------------------|
| 底锅水  | 17.01±0.13 | 6.81±0.18 | 8.37±0.35  | 1.12±0.12                |
| BG11 | 29.42±0.79 | 5.74±0.23 | 7.60±0.29  | 0.97±0.03                |

## 4 结论

四尾栅藻对高 COD、高氮、高磷浓度的底锅水具有很好的耐受性和净化作用,在底锅水质量分数为 5%、pH 为 6、接种量为 10%、光照强度为 8 000 Lux 的条件下,对 COD、TN、TP 的去除率分别达到 96.21%、94.11% 和 71.6%。四尾栅藻能够有效地处理底锅水,同时底锅水可以替代 BG11 培养基用于栅藻的生物量以及油脂积累。利用栅藻处理酿酒废水底锅水是一种可持续的、绿色环保的、有效的废水净化方式,为酿酒废水的净化提供了一种新的途径。

### 参考文献

- [1] 高宇宸.白酒厂底锅水综合预处理工艺研究[D].太原:山西大学,2018.
- [2] 周建丁,周健.白酒工业废水处理现状及展望[J].四川理工学

- 院学报(自然科学版),2008,21(6):74-77,87.
- [3] 李扬.微藻处理污水研究进展[J].水资源开发与管理,2020,(8):13-18.
- [4] Song M,Pei H,Hu W,*et al.*Evaluation of the potential of 10 microalgal strains for biodiesel production [J]. Bioresource Technology,2013,141:245-251.
- [5] Brar A,Kumar M,Pareek N.Comparative appraisal of biomass production, remediation, and bioenergy generation potential of microalgae in dairy wastewater[J].Frontiers in Microbiology,2019,10:678.
- [6] Batista A P, Ambrosano L, Graça S, *et al.* Combining urban wastewater treatment with biohydrogen production—An integrated microalgae-based approach[J].Bioresource Technology,2015,184:230-235.
- [7] 王洪波,王鹏冲,牛旭东,等.栅藻 *Desmodesmus sp.SNN1* 处理生活污水及油脂积累研究[J].山东建筑大学学报,2023,38(5):1-9.
- [8] 杨宋琪,魏喜红,王丽娟,等.不同氮/碳源组合条件下斜生栅藻的生长、光合及油脂产率[J].中国油脂,2020,45(12):112-117.
- [9] Chong A M Y,Wong Y S,Tam N F Y.Performance of different microalgal species in removing nickel and zinc from industrial wastewater[J].Chemosphere,2000,41(1-2):251-257.
- [10] 马艳芳,郭亭,何荣玉,等.IAA 对高盐废水培养微藻生长特性与氮磷去除的影响[J/OL].农业机械学报,1-14[2023-12-01].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1964.S.20230924.1752.004.html>.
- [11] 刘明艳.利用海水一味精废水培养淡水微藻及规模化生产物质[D].济南:山东大学,2022.
- [12] Mandotra S K,Kumar P,Suseela M R,*et al.*Evaluation of fatty acid profile and biodiesel properties of microalga *Scenedesmus abundans* under the influence of phosphorus, pH and light intensities [J]. Bioresource Technology,2016,201:222-229.
- [13] 陈丽苹.水稻秸秆生物炭对四尾栅藻富集酸性水体中 Mn(II) 的影响机制[D].湘潭:湖南科技大学,2022.
- [14] 谭啸,石琳,段志鹏,等.氮磷比对微囊藻与栅藻磷赋存及分配的影响[J].湖泊科学,2022,34(5):1461-1470.
- [15] Abou-Shanab R A, Ji M K, Kim H C, *et al.* Microalgal species growing on piggyery wastewater as a valuable candidate for nutrient removal and biodiesel production[J].Journal of Environmental Management,2013,115(115):257-264.
- [16] Fontoura D T J, Rolim S G, Farenzena M, *et al.* Influence of light intensity and tannery wastewater concentration on biomass production and nutrient removal by microalgae *Scenedesmus sp.* [J]. Process Safety and Environmental Protection,2017,111(111):355-362.
- [17] Martinez M E, Sánchez S, Jimenez J M, *et al.* Nitrogen and phosphorus removal from urban wastewater by the microalga *Scenedesmus obliquus* [J]. Bioresource Technology,2000,73(3):263-272.
- [18] 席晶晶.不同氮磷比混合污水对两种微藻生长的影响及其机制探究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
- [19] 蔡敬,赵陆敏,黄旭雄,穆亮亮.不同氮磷比条件下绿球藻对猪场污水的净化效率[J].环境科学学报,2017,37(10):3696-3701.
- [20] 余江,陶红群,王亚婷,等.磷受控对酿酒废水-微藻培育耦合体系的影响[J].西南交通大学学报,2019,54(3):655-662.
- [21] 王鹏冲.新分离藻株处理生活污水、二级出水及资源化利用研究[D].济南:山东建筑大学,2023.
- [22] 罗淋.基于沼液和市政污水培养的栅藻两步法生长和油脂合成研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.
- [23] 巫小丹.利用有机废水生产微藻生物质的研究[D].南昌:南昌大学,2017.
- [24] 姜孝飞,杜延生,张海平.基于细胞尺度的光照对四尾栅藻生长的影响[J].中国环境科学,2020,40(11):5020-5026.
- [25] 张晶.混合营养模式下利用斜生栅藻同步去除养分和重金属[D].太原:太原理工大学,2022.
- [26] 杜学振,申婷,邢冠润,等.菌藻共生处理猪场废水的效果研究[J].浙江畜牧兽医,2022,47(1):1-7.
- [27] Ferreira A,Ribeiro B,Marques A P,*et al.**Scenedesmus obliquus* mediated brewery wastewater remediation and CO<sub>2</sub> biofixation for green energy purposes [J]. Journal of Cleaner Production,2017,165:1316-1327.
- [28] Chen X,Hu Z,Qi Y,*et al.*The interactions of algae-activated sludge symbiotic system and its effects on wastewater treatment and lipid accumulation [J].Bioresource Technology,2019,292:122017.
- [29] 杨小峰,张静,张沁荣.不同氮磷比对斜生栅藻生长的影响[J].科学咨询(科技·管理),2021,(3):90-91.
- [30] Apandi N,Mohamed RSMR,Al-Gheeti A,*et al.**Scenedesmus* biomass productivity and nutrient removal from wet market wastewater, a bio-kinetic study [J].Waste and Biomass Valorization,2019,10(10):2783-2800.
- [31] 凌云,陈姗,石文宣,等.利用城市生活废水培养栅藻以生产生物柴油的研究[J].环境科学与技术,2016,39(1):121-127,170. ■
- (上接第 205 页)
- [13] 孙锦,蓝平,廖安平,等.微波超声波辅助制备木薯淀粉纳米颗粒及其特性表征[J].食品工业科技,2018,39(20):128-134,140.
- [14] 张冬丽.乙酰化玉米秸秆纳米纤维素的制备及应用研究[D].无锡:江南大学,2016.
- [15] 吴振华.不同晶型纳米纤维素的制备表征及乙酰化研究[D].广州:华南理工大学,2019.
- [16] 袁亚芳.乙酰化纳米纤维素的制备及其作为分散稳定剂的应用研究[D].南宁:广西大学,2021.
- [17] 陶鹏.蔗渣纳米纤维素的制备及其热稳定性影响机制研究[D].南宁:广西大学,2019.
- [18] 王正武,潘远凤,蔡平雄.热处理蔗渣纤维素/PVA 复合膜的制备及性能研究[J].塑料工业,2022,50(4):168-175.
- [19] 吴富奇.新型聚乙烯醇/木薯淀粉复合活性食品包装膜的制备与性能[D].南宁:广西民族大学,2021.
- [20] 孟令馨,徐淑艳,谢元仲.聚乳酸/乙酰化纳米纤维素薄膜制备及性能研究[J].食品工业科技,2016,37(11):249-252,258.
- [21] Becke A D. A new mixing of hartree-fock and local density-functional theories [J]. J Chem Phys,1993,98(2):1372-1377.
- [22] Lu T, Chen Q X. Independent gradient model based on Hirshfeld partition: A new method for visual study of interactions in chemical systems [J]. Journal of Computational Chemistry,2022,43(8):539-555. ■