【材料科学 / Materials Science】

氮受控对酒糟废水-微藻培育耦合体系的影响

蒋宜峰¹, 杨世利^{2,3}, 魏 威^{2,3}, 王 萍^{2,3}, 张 利¹, 余 江^{2,3,4}

1) 四川农业大学理学院, 四川雅安 625014; 2) 四川大学建筑与环境学院, 四川成都 610065;
3) 四川大学新能源与低碳技术研究院, 四川成都 610065; 4) 四川大学宜宾产业技术研究院, 四川宜宾 644000

摘 要: 为考察酒糟废水-微藻培育耦合体系的最适氮营养条件, 运用室内受控实验, 调控酒糟废水总氮浓度, 考察莱茵衣藻、二形栅藻分别在单一培养和共培养条件下的生长特性, 计算酒糟废水中营养盐的去除率。研究结果显示, 较之二形栅藻, 莱茵衣藻对氮的需求更为敏感。当初始氮磷质量比为 2.45, 且初始总氮(total nitrogen, TN) 质量浓度为 40.25 mg/L 时, 对莱茵衣藻, 最终生物量为 879.50 mg/L, 藻蛋白质量浓度达 69.00 mg/L, 对总氮、总磷(total phosphorus, TP) 和化学需氧量(chemical oxygen demand, COD) 的去除率分别为 93.68%、90.81% 和 72.57%; 对二形栅藻, 最终生物量为 775.00 mg/L, 藻蛋白质量浓度为 154.53 mg/L, 对 TN、TP 和 COD 的去除率分别为 96.85%、70.80% 和 82.06%。共培养条件下, 莱茵衣藻在生长和对氮磷等资源的利用方面受二形栅藻的抑制影响较明显, 当初始氮磷质量比为 2.45, 初始 TN 质量浓度为 40.25 mg/L 时, 莱茵衣藻对 TN 和 TP 的去除率分别为 97.37% 和 74.74%; 共培养条件下微藻对酒糟废水 COD 的去除结果与二形栅藻类似。研究发现, 利用酒糟废水-微藻培育耦合体系、单一培养体系和共培养体系, 酒糟废水水质均能满足地表水环境质量的 IV 类水总氮(≤ 1.5 mg/L) 和发酵酒精与白酒工业水污染物排放标准的要求。

关键词: 生物材料; 酒糟废水; 氮调控; 莱茵衣藻; 二形栅藻; 耦合体系

中图分类号: X52 **文献标志码:** A **doi:** 10.3724/SP.J.1249.2020.05528

Effect of nitrogen control on the coupling system of brewery waste water and microalgae cultivation

JIANG Yifeng¹, YANG Shili^{2,3}, WEI Wei^{2,3}, WANG Ping^{2,3},
ZHANG Li¹, and YU Jiang^{2,3,4}

1) College of Science, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, Sichuan Province, P. R. China
2) College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan Province, P. R. China
3) Institute of New Energy and Low Carbon Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan Province, P. R. China
4) Yibin Institute of Industrial Technology, Sichuan University, Yibin 644000, Sichuan Province, P. R. China

Abstract: In order to investigate the optimal nitrogen nutrition conditions of the brewery waste water-microalgae cultivation coupling system, the control variable method was used to regulate the total nitrogen concentration of the brewery waste water. The growth characteristics of *Chlamydomonas reinhardtii* and *Scenedesmus dimorphus* under single culture and co-culture conditions were observed, and the absorption and removal efficiency of nutrients in

Received: 2019-10-06; **Accepted:** 2020-03-20

Foundation: National Key R & D Program of China (2018YFC1802605); National Natural Science Foundation of China (31100374); Foundation of Chengdu Science and Technology Bureau (2015-HM01-00013-SF)

Corresponding author: Professor YU Jiang. E-mail: yuj@scu.edu.cn

Citation: JIANG Yifeng, YANG Shili, WEI Wei, et al. Effect of nitrogen control on the coupling system of brewery waste water and microalgae cultivation [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2020, 37(5): 528-535. (in Chinese)

brewery waste water was explored. The results show that the nitrogen requirement of *Chlamydomonas reinhardtii* was higher than that of *Scenedesmus dimorphus*. When the initial total nitrogen (TN) concentration was 40.25 mg/L and the initial nitrogen to phosphorus ratio was 2.45, for *Chlamydomonas reinhardtii*, the final biomass reached 879.50 mg/L, algae protein content reached 69.00 mg/L, and total nitrogen, total phosphorus (TP), organic matter (chemical oxygen demand, COD) removal rate reached 93.68%, 90.81% and 72.57%, respectively. For *Scenedesmus dimorphus*, the biomass reached 775 mg/L, and the content of algae protein reached 154.53 mg/L. The final removal rates of total nitrogen, TP, COD reached 96.85%, 70.80% and 82.06%, respectively. Under the co-culture condition, the growth and utilization of nitrogen and phosphorus in *Chlamydomonas reinhardtii* were obviously affected by the inhibition of *Scenedesmus dimorphus*. When the initial TN concentration was 40.25 mg/L, the initial nitrogen-phosphorus ratio was 2.45, the removal rates of TN and TP were 97.37% and 74.74%. However, the removal of COD from brewery waste water by microalgae under co-culture conditions was similar to that of *Scenedesmus dimorphus*. The study show that through the brewery waste water-microalgae cultivation coupling system, whether it is a single or co-culture system, the brewery waste water can meet the total nitrogen requirement (1.5 mg/L) of class IV water in the surface water environmental quality standard.

Key words: biomaterials; brewery waste water; nitrogen regulation; *Chlamydomonas reinhardtii*; *Scenedesmus dimorphus*; coupling system

目前, 人类正面临水资源短缺、能源匮乏的双重危机与挑战, 基于微藻培养的污水深度处理和物质能源生产耦合系统由此应运而生, 并日益成为众多研究者关注的热点^[1-2]. 微藻生产生物能源过程中, 利用污水培养富油微藻, 不仅可以利用微藻使污水再生循环利用, 还可以为能源微藻生产生物柴油提供资源^[3-6]. 张波等^[7]研究表明, 以废水作为培养基培养高附加值微藻的关键在于优良藻种的筛选.

氮是构成微藻蛋白质的重要元素, 是微藻细胞生长的必要元素之一. 不同氮浓度会影响微藻细胞的生长速度, 在氮限制状态下, 藻体中蛋白质的合成会受到影响, 如细胞中蛋白质浓度降低和蛋白质合成停止^[8]. 而在氮浓度异常高的情况下, 微藻细胞生长培养基中的氮磷质量比会失调, 此时细胞只会过度吸收氮, 不利于细胞分裂, 从而抑制微藻生长^[9-12]. 只有当培养环境中的氮在一定的浓度范围内才会有利于微藻生长, 且不同藻种对氮浓度的要求也存在差异. 迄今, 有关能源微藻在不同种类废水中的生长特性的研究仍鲜见报道. 本研究利用室内受控实验, 通过调控酒糟废水的总氮浓度, 考察莱茵衣藻和二形栅藻两种微藻在单一和共培养条件下的生长状况、废水中营养盐的吸收去除效率以及微藻藻蛋白质合成情况, 获得适合微藻生长的酒糟废水的总氮浓度, 对能源微藻与酒糟废水耦合培育体系的深入研究具有重要意义.

1 材料与方法

1.1 实验材料

莱茵衣藻 (*Chlamydomonas reinhardtii*) 和二形栅藻 (*Scenedesmus dimorphus*) 均属于绿藻, 取自于四川大学藻类学藻种室.

1.2 酒糟废水培养基

本实验所处理的酒糟废水取自中国四川某酒厂. 实验前, 经多级皂土 (250.00 mL 液体加入 10.00 g 皂土)、离心处理 (4 800 r/min, 10 min), 并调节 pH 值至中性后置于 120 °C 高压灭菌 30 min, 以去除废水中的悬浮物和病原微生物. 处理前后废水的 pH 值、有机物 (即化学需氧量, chemical oxygen demand, COD)、总氮 (total nitrogen, TN) 和总磷 (total phosphorus, TP) 等物理化学指标见表 1.

表 1 酒糟废水基本物理化学指标

Table 1 Basic physical and chemical indicators of winery waste water

项 目	pH 值	$\rho(\text{COD})/$ (mg · L ⁻¹)	$\rho(\text{TN})/$ (mg · L ⁻¹)	$\rho(\text{TP})/$ (mg · L ⁻¹)
原 水	4.87	4 037.0	87.76	35.41
预处理后	6.92	3 890.0	84.80	34.90
稀释 2 倍后	6.98	1 867.5	40.25	16.40

通过预处理,采用不同稀释倍数(原水的体积分数为 100%;稀释 2 倍后体积分数为 50%;稀释 4 倍后体积分数为 25%;稀释 8 倍后体积分数为 12.5%)的酒糟废水用于培养微藻,发现在未稀释废水的培养基中微藻均未能有效繁殖,而在不同稀释倍数培养条件下微藻均能生长良好,可能是由于废水在未稀释状态下含有其他浓度较高的有毒有害物质,从而对微藻生长造成一定影响。

1.3 实验方法与指标测定

1.3.1 实验方法

本研究以稀释 2 倍的酒糟废水作为培养基,调节总氮初始浓度,设置 5.00、14.00、40.25、120.00、360.00 和 1 100.00 mg/L 等 6 个质量浓度梯度组,分别独立培养莱茵衣藻和二形栅藻,同时设置两种微藻的共培养实验组。其中,每组设 3 个平行对照组,对照组总氮的初始质量浓度为 40.25 mg/L,而培养基中总磷质量浓度(16.4 mg/L)及其他介质条件保持不变。设置培养条件为:温度为 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$,光照强度为 2 000 lux,每天人工摇动培养瓶使微藻始终均匀悬浮于培养液中,定期取一定量培养液,测定微藻生物量(恒质量法),以及培养液总氮、总磷和有机物质量浓度和 pH 值等指标。实验周期为 17 d。

1.3.2 指标测定方法

1) 微藻生物量、比生长速率测定。把藻细胞沉淀置于 $60 \sim 80^\circ\text{C}$ 箱烘干至恒质量,取出后于干燥器中自然冷却并称其质量。微藻比生长速率 μ_m 为衡量微藻细胞生长的指标之一,计算公式^[12]为

$$\mu_m = \frac{\ln X_2 - \ln X_1}{t_2 - t_1} \quad (1)$$

其中, X_1 是起始取样时间 t_1 的生物量; X_2 是结束取样时间 t_2 的生物量。

2) 蛋白质产量测定。采用改良考马斯亮蓝 G-250 染色法测定上清液中的蛋白质浓度,即微藻的蛋白质质量浓度(按鲜质量计)^[13]。

3) 氮、磷和有机物的吸收速率和去除率测定。氮、磷和有机物的吸收速率 v 计算公式^[12]为

$$v = \frac{(\rho_0 - \rho_t)V}{t} \quad (2)$$

其中, ρ_0 为起始时培养液中 TN、TP 和 COD 的质量浓度; ρ_t 为结束时培养液中 TN、TP 和 COD 的质量浓度; V 为培养液体积; t 为培养时间。

TN、TP 和 COD 的去除率 r 为

$$r = \frac{\rho_0 - \rho_t}{\rho_0} \times 100\% \quad (3)$$

1.4 数据统计与分析

运用 Microsoft Excel 2016 和 SPSS 22.0 软件进行数据统计分析,并用 OriginPro 9.1 软件制图。

2 结果与讨论

2.1 氮调控对微藻生长特性的影响

不同 N 质量浓度条件下,各组微藻生长趋势如图 1 和图 2。由图 1 和图 2 可见,不同的总氮质量浓度对微藻生长的影响比较明显。实验周期内,当初始 TN 质量浓度为 5 mg/L 时,莱茵衣藻、二形栅藻和共培养下的 μ_m 分别为 0.258、0.160 和 0.175 d^{-1} ,均为实验组最低。随着 TN 质量浓度升高, μ_m 先升后降,莱茵衣藻的 μ_m 在 TN 质量浓度为 120 mg/L 时达到最大值 0.390 d^{-1} ,与初始 TN 质量浓度分别为 40.25 mg/L (0.380 d^{-1}) 和 360.00 mg/L (0.386 d^{-1}) 时相比, μ_m 分别上升了 2.67% 和 1.06%;二形栅藻和共培养微藻均在初始 TN 质量浓度为 40.25 mg/L 时达到最大值,分别为 0.32 d^{-1} 和 0.35 d^{-1} 。

图 1 氮调控下微藻的生长曲线

Fig. 1 Microalgae growth trends under nitrogen control

初始 TN 质量浓度较低组(5.00 mg/L 和 14.00 mg/L),前 7 d 内,微藻生长速度随着培养时间延长,呈增长趋势,但总体滞后于其他实验组,到第 7 天开始生长进入平缓期。实验结束时,初始 TN 质量浓度为 5.00 mg/L 的莱茵衣藻和二形栅藻的生物

图2 氮调控下微藻比生长速率的比较

Fig. 2 Comparison of the specific growth rates of microalgae under nitrogen regulation

量均处于较低水平,分别为110.0 mg/L和37.5 mg/L,同样,共培养条件下的最终生物量也仅约37.5 mg/L;而初始TN质量浓度为14.00 mg/L的莱茵衣藻和二形栅藻,生物量最终达388.00 mg/L和175.00 mg/L,共培养条件下生物量达到223.75 mg/L,也明显低于其他组。

初始TN质量浓度40.25 mg/L和360.00 mg/L两组的莱茵衣藻呈现出良好的生长趋势,直到第11天其生长速率才均有所降低,最终生物量分别达到879.5 mg/L和974.5 mg/L。对于单一培养条件下的二形栅藻,初始TN质量浓度为40.25 mg/L和360.00 mg/L时,在培养前9 d内生长趋势同步,到第11天时TN质量浓度为40.25 mg/L组的生物量达到最大,为775 mg/L,TN浓度为360 mg/L组在第13天生物量达到562.5 mg/L。莱茵衣藻和二形栅藻共培养条件下,同样的初始TN质量浓度,最终生物量分别达到762.50 mg/L和356.25 mg/L。

从图1可看出,初始TN质量浓度为120 mg/L组的莱茵衣藻生长最佳,从第3天开始生长速度明显增大,到第9天开始其生物量已高于其他组,实验结束时生物量高达1 045 mg/L。二形栅藻单一培养条件下,前7天内,微藻生物量随培养时间呈快速上升趋势,并在第7 d达到最大值(743.75 mg/L)。实验发现,共培养条件下的微藻生长曲线低于单一培养条件,实验结束时微藻生物量达到500 mg/L,这与控氮变磷条件下共培养的微藻生长曲线略高于单一培养下的二形栅藻有一定差异^[6],表明共培养体系的影响因素更为复杂。从图1还可见,组莱茵衣藻明显受到了环境中高浓度氮的胁迫,

且随着培养时间的增长,培养基中仅有的磷被消耗殆尽,出现了氮磷质量比极度失调的情况,而细胞对氮营养的过量吸收,不利于细胞分裂,从而生长受到明显的抑制^[9],也导致该组莱茵衣藻的最终生物量比其他组低很多。

2.2 氮调控对微藻蛋白质浓度的影响

氮调控下微藻蛋白质质量浓度的变化见图3。由图3可见,不同培养条件下的微藻蛋白质质量浓度整体上均随培养时间的增加而逐渐增多,但TN质量浓度为5.00 mg/L和14.00 mg/L组的蛋白质质量浓度均明显处于较低水平,尤其是5.00 mg/L组的蛋白质质量浓度始终处于最低,培养到第17天时莱茵衣藻和二形栅藻的蛋白质质量浓度最终分别为5.64 mg/L和8.25 mg/L,共培养条件下的微藻蛋白质质量浓度为5.10 mg/L。相关研究发现,低氮水平改变了微藻与脂肪酸生物合成相关的碳代谢,使光合作用形成的糖类由于氮的缺乏,不能有效合成氨基酸,转而形成脂肪酸积累在细胞内^[14-15]。在氮缺乏时,随着培养时间的增加,微藻在营养缺乏的培养基中生长,生理活动不能正常进行,藻体蛋白质等内含物合成减弱,细胞分裂减缓或受阻,细胞生长迟缓^[8]。TN质量浓度为1 100 mg/L组的蛋白质质量浓度也始终保持较低水平,其中,莱茵衣藻最终蛋白质质量浓度仅有48.08 mg/L,这可能是因为该组的氮磷质量比严重失调,氮质量浓度超高(意味着严重的磷限制),处于这样的培养环境中,藻细胞分裂受到强烈抑制,生物量低,导致莱茵衣藻蛋白质质量浓度比其他组都低。

图3 氮调控下微藻蛋白质质量浓度的变化

Fig. 3 Changes of protein concentration of microalgae under nitrogen regulation

当初始 TN 质量浓度为 120 mg/L 时, 微藻蛋白质合成情况最好, 最终莱茵衣藻蛋白质质量浓度为 81.48 mg/L, 二形栅藻蛋白质质量浓度为 160.62 mg/L, 共培养微藻蛋白质质量浓度为 88.96 mg/L. 此外, 总氮质量浓度在 40.25 ~ 360.00 mg/L 时, 微藻蛋白质合成情况较好, 这可能是因为在氮充足等环境良好的情况下, 藻体细胞代谢正常, 生长良好, 蛋白质等细胞内初级代谢产物能正常合成^[16].

2.3 氮调控下微藻对氮磷及有机物去除效果的影响

2.3.1 不同 N 质量浓度下微藻对 TN 去除效果的影响

从图 4 和图 5 可知, 莱茵衣藻对 TN 的吸收速率随 TN 质量浓度的升高逐渐上升, 单一培养下的二形栅藻和共培养下的两种微藻对 TN 的吸收速率随着 TN 质量浓度的升高先降后升. 当初始 TN 质量浓度为 40.25 mg/L 时, 二形栅藻和共培养下微藻对 TN 的吸收速率最终分别为 0.090 1 d⁻¹ 和 0.066 8 d⁻¹. 当初始 TN 质量浓度为 1 100 mg/L 时, 3 种培养条件微藻 TN 吸收速率分别为 1.776 6、2.628 8 和 4.254 9 d⁻¹. 莱茵衣藻对 TN 的去除率随着初始 TN 质量浓度的增加先升后降. TN 质量浓度为 14 mg/L 的莱茵衣藻, TN 去除量达到 13.32 mg/L, 去除率最高达 95.15%, 基本达到了地表水环境质量标准 (GB 3838—2002) 的 III 类水总氮要求 (≤ 1.5 mg/L)^[2]. 初始 TN 质量浓度低于 40.25 mg/L 时, 二形栅藻和共培养的微藻对 TN 的去除效率几乎保持一致, 均高于同等培养条件下莱茵衣藻对 TN 的去除效率, 但无明显差异 ($P > 0.05$). 随着初始 TN 质量浓度升高, 二形栅藻对 TN 的去除优势在 3 种微藻中显得更加明显. 初始 TN 质量浓度为 1 100 mg/L 时, 微藻的 TN 去除量急剧增加, 达到所有实验组中的最大值, 分别为 788.55 mg/L

图 4 氮调控下微藻对 TN 吸收速率的比较
Fig. 4 Comparison of TN absorption rate in microalgae under nitrogen regulation

(莱茵衣藻)、801.27 mg/L (二形栅藻) 和 777.33 mg/L (共培养), 但去除率均在 70% 左右.

图 5 不同 N 质量浓度下微藻对 TN 去除率及去除量的比较
Fig. 5 Comparison of the TN removal efficiency and mass of microalgae under different initial N concentrations

根据式(3)可知, 当微藻对 TN 的吸收量一定时, 微藻质量越低, 单位质量的微藻对 TN 的吸收速率越高. 由于 TN 质量浓度为 1 100 mg/L 时, 微藻生长均受到不同程度的抑制, 藻细胞对 TN 过量吸收, 不利于藻细胞的分裂^[9], 从而出现 TN 去除量高而藻体生物量低的情况, 致使该实验组微藻的 TN 吸收速率比其他组明显增大.

综合比较各实验组中微藻对 TN 的吸收速率、去除率和去除量可知, 初始 TN 质量浓度为 40.25 mg/L 时, 微藻对 TN 的去除效果最优, 莱茵衣藻、二形栅藻和共培养下的微藻对 TN 的去除率分别达到 93.68%、96.85% 和 97.37%, 基本达到了地表水环境质量标准 (GB 3838—2002) 的 IV 类水总氮的要求 (≤ 1.5 mg/L)^[2].

2.3.2 氮调控下微藻对磷去除效率的影响

实验周期内, 各组微藻对 TP 的吸收速率、去除率及去除量见图 6 和图 7. 总磷的去除路径主要包括藻体的吸收作用和磷酸盐的吸附沉淀作用. 对比废水中 3 种微藻培养下的 TP 浓度变化 (图 6) 与微藻的生长曲线 (图 1) 可知, TP 去除与微藻的生长趋势基本吻合.

对莱茵衣藻来说, 当初始总氮质量浓度大于 14 mg/L 时, TP 的去除率均超过 80%, 尤其当氮磷质量比为 2.45、初始总氮质量浓度为 40.25 mg/L 时, 对 TP 的最终去除量达 14.89 mg/L, 去除率达

图6 氮调控下培养液中TP质量浓度的变化

Fig. 6 Changes in TP concentration of the culture medium under nitrogen control

图7 不同N浓度下微藻对TP去除率和去除量的比较

Fig. 7 Comparison of the TP removal efficiency and mass of microalgae under different initial N concentrations

90.81%；当初始总氮质量浓度为5 mg/L时，藻体对TP的去除率最终只有9.81%。此外，莱茵衣藻对TP的去除效率明显高于二形栅藻。当初始总氮质量浓度为40.25 mg/L时，二形栅藻和共培养下的微藻对TP的去除率只有70.80%和74.74%。共培养下微藻对TP的去除效果与二形栅藻较为一致，这也说明在共培养条件下二形栅藻对废水的资源化利用起主导作用，并可能对莱茵衣藻吸收TP起到

一定程度的抑制，这与本课题组就控磷对二形栅藻吸收磷营养盐的研究结果基本一致^[6]。

王海英等^[17]利用城市污水培养蛋白核小球藻，发现在培养第6天时，培养基中TP的去除率已达到80%以上，但随培养时间延长，去除效果逐渐变低，与本实验结果较为接近。经处理后，废水中总磷质量浓度基本达到发酵酒精与白酒工业水污染物排放标准(GB 27631—2011)间接排放小于3.0 mg/L的要求。

2.3.3 氮调控下微藻对COD去除效果的影响

实验周期内，各组微藻对酒糟废水中COD的吸收速率、去除率及去除量见图8和图9。随着培养时间的延长，酒糟废水培养基中COD的质量浓度呈现明显下降趋势，实验结束时，莱茵衣藻实验组COD的质量浓度均达到最低值，各实验组中COD的质量浓度分别为87.5、182.0、512.5、502.0、547.5和570.0 mg/L，COD去除率最大分别达到62.28%、72.00%、72.57%、73.12%、70.68%和69.48%。从图9可见，总体上莱茵衣藻对COD的去除效果低于二形栅藻，但不存在显著性差异。而二形栅藻各实验组COD的质量浓度在实验初期随着微藻的生长呈明显降低趋势，到第13天实验组培养基内COD的质量浓度达到最小值，分别为37.0、82.0、259.5、317.0、510.0和820.0 mg/L，COD最大去除率分别达84.05%、87.38%、86.10%、83.03%、72.69%和56.09%。随着培养时间延长，第13天后培养基内COD的质量浓度逐步增大，可能是因为藻体在生长一段时间

图8 氮调控下培养液中COD质量浓度的变化

Fig. 8 Changes of COD concentration of the culture medium under nitrogen regulation

后, 由于培养基内营养物质的减少及光照不足等原因, 藻体自身分泌产生一些有机物, 降低微藻自身对 COD 的去除效果. 共培养条件下微藻对培养基内的 COD 去除规律与二形栅藻类似, 在第 15 天左右实验组培养基内的 COD 质量浓度达到最小值, 分别为 32.0、87.0、272.5、385.0、660.0 和 795.0 mg/L, COD 的最大去除率分别达 86.21%、86.62%、85.41%、79.38%、64.66% 和 57.43%. 经处理后, 废水中 COD 的质量浓度基本达到发酵酒精与白酒工业水污染物排放标准 (GB 27631—2011) 间接排放小于 400 mg/L 的要求.

图 9 不同 N 质量浓度下微藻对 COD 去除率和去除量的比较

Fig. 9 Comparison of the COD removal efficiency and mass of microalgae under different N concentrations

3 结 论

1) 单一培养条件下, 莱茵衣藻对磷的需求总体上大于二形栅藻对氮的需求, 当初始 TN 质量浓度为 40.25 mg/L、初始氮磷质量比为 2.45 时, 莱茵衣藻最终生物量达 879.5 mg/L, 藻蛋白质量浓度达 69.00 mg/L, 对 TN、TP 和 COD 的最终去除率分别达到 93.68%、90.81% 和 72.57%; 二形栅藻的生物量最高达 775 mg/L, 藻蛋白质量浓度达 154.53 mg/L, 对 TN、TP 和 COD 的最终去除率分别达到 96.85%、70.80% 和 82.06%.

2) 共培养条件下, 莱茵衣藻在生长方面和对氮磷等资源化利用方面受二形栅藻抑制影响较明显, 当初始 TN 质量浓度为 40.25 mg/L、初始氮磷质量比为 2.45 时, 对 TN 和 TP 的去除率分别为

97.37% 和 74.74%; 共培养条件下微藻对酒糟废水 COD 的去除规律与二形栅藻类似.

3) 利用酒糟废水-微藻培育耦合体系, 单一培养体系和共培养体系, 酒糟废水水质总体均能达到地表水环境质量标准 (GB 3838—2002) 和发酵酒精与白酒工业水污染物排放标准 (GB 27631—2011) 的要求.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2018YFC1802605); 国家自然科学基金资助项目 (31100374); 成都市科技局资助项目 (2015-HM01-00013-SF)

作者简介: 蒋宜峰 (1996—), 四川农业大学硕士研究生. 研究方向: 植物生理生化. E-mail: 819174722@qq.com

引 文: 蒋宜峰, 杨世利, 魏 威, 等. 氮受控对酿酒糟废水-微藻培育耦合体系的影响[J]. 深圳大学学报理工版, 2020, 37(5): 528-535.

参考文献 / References:

- [1] 苗长林, 凡 佩, 吕鹏梅, 等. 微藻直接离子液体脂肪酶制备生物柴油[J]. 太阳能学报, 2019, 40(9): 2695-2700.
MIAO Changlin, FAN Pei, LÜ Pengmei, et al Preparation of biodiesel from microalgae direct ionic liquid lipase [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2019, 40(9): 2695-2700. (in Chinese)
- [2] 刘林林, 黄旭雄, 危立坤, 等. 15 株微藻对猪场养殖污水中氮磷的净化及其细胞营养分析[J]. 环境科学学报, 2014, 34(8): 1986-1994.
LIU Linlin, HUANG Xuxiong, WEI Likun, et al. Removal of nitrogen and phosphorus by 15 strains of microalgae and their nutritional values in piggery sewage [J]. Acta Scientiæ Circumstantiæ, 2014, 34(8): 1986-1994. (in Chinese)
- [3] 何剑青, 龚 勋, 彭 阳, 等. 基于微藻气候生长模型的微藻柴油水足迹分析[J]. 太阳能学报, 2019, 40(7): 1972-1979.
HE Jianqing, GONG Xun, PENG Yang, et al. Water footprint assessment of microalgae biodiesel based on microalgae climate-growth model [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2019, 40(7): 1972-1979. (in Chinese)
- [4] 脱金华, 任洪艳, 刘方舟, 等. 利用实际市政污水培养小球藻及优化外加碳源[J]. 应用与环境生物学报, 2019, 25(1): 184-190.
TUO Jinhua, REN Hongyan, LIU Fangzhou, et al. Cultivation of chlorella vulgaris using real municipal wastewater and optimization of external carbon source [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2019, 25(1): 184-190. (in Chinese)

- [5] 马红芳, 庄黎宁. 含油微藻净化废水耦合生产生物柴油原料的关键技术研究进展[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(9): 170-177.
- MA Hongfang, ZHUANG Lining. Research progress on the key technologies for the production of biodiesel feedstock by the coupling of oily microalgae purification wastewater [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(9): 170-177. (in Chinese)
- [6] 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]. 西南交通大学学报自然科学版, 2019, 54(3): 655-662.
- YU Jiang, TAO Hongqun, WANG Yating, et al. Influence of phosphorus control on coupling system of winery wastewater and microalgae cultivation [J]. Journal of Southwest Jiaotong University Natural Science, 2019, 54(3): 655-662. (in Chinese)
- [7] 张波, 崔梦瑶, 张安龙, 等. 适于生活废水中快速生长的微藻筛选及其培养条件优化[J]. 陕西科技大学学报, 2019, 37(3): 21-26.
- ZHANG Bo, CUI Mengyao, ZHANG Anlong. Screening of microalgae suitable for rapid growth in domestic wastewater and optimization of its cultivation conditions [J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology, 2019, 37(3): 21-26. (in Chinese)
- [8] 赵阳国, 师振华, 王亚洁, 等. 利用微拟球藻去除污水中氮磷及生产富油生物质[J]. 环境工程学报, 2016, 10(5): 2367-2374.
- ZHAO Yangguo, SHI Zhenhua, WANG Yajie, et al. Removal of nitrogen and phosphorus in urban sewage and simultaneous production of oil-rich biomass by nannochloropsis sp [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(5): 2367-2374. (in Chinese)
- [9] 常婷, 许智慧, 程鹏飞, 等. 不同氨氮浓度对4株常见藻株生长及酶活性的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(8): 3642-3649.
- CHANG Ting, XU Zhihui, CHENG Pengfei, et al. Effects of different concentrations of ammonia nitrogen on the growth and enzyme activity of four common algae strains [J]. Environmental Science, 2019, 40(8): 3642-3649. (in Chinese)
- [10] 邵瑜. 微藻对养猪废水氮磷的资源化利用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- SHAO Yu. Research on the nitrogen/phosphorus recovery of piggery wastewater by microalgae [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016. (in Chinese)
- [11] WANG Ping, YU Jiang, QIN Yuanqin, et al. The influence of nutrients on the growth of bio-energy microalgae *Chlamydomonas reinhardtii* [J]. Journal of Biobased Materials and Bioenergy, 2016, 10: 229-233.
- [12] WANG Yizheng, YU Jiang, WANG Ping, et al. Response of energy microalgae *Chlamydomonas reinhardtii* to nitrogen and phosphorus stress [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 10: 1-9.
- [13] 顾林娣, 高敏敏. 螺旋藻粉中蛋白质等几种成分的提取方法比较[J]. 植物生理学通讯, 1998, 34(3): 210-212.
- GU Lindi, GAO Minmin. Comparison of extracting methods for protein and several components from spirulina platensis [J]. Plant Physiology Journal, 1998, 34(3): 210-212. (in Chinese)
- [14] OHTA S, CHANG T, AOZASA O, et al. Sustained production of arachidonic and eicosapentaenoic acids by the red alga *Porphyridium purpureum* cultured in a light/dark cycle [J]. Journal of Fermentation & Bioengineering, 1992, 74(6): 398-402.
- [15] 黄旭雄, 周洪琪, 袁灿东, 等. 氮源及浓度对微绿球藻营养价值的影响[J]. 上海水产大学学报, 2003(2): 113-116.
- HUANG Xuxiong, ZHOU Hongqi, YUAN Candong, et al. The effects of nitrogen source and concentration on the nutritional value of *Nannochloropsis oculata* [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2003(2): 113-116. (in Chinese)
- [16] AMORIM M L, SOARES J, VIEIRA B B, et al. Extraction of proteins from the microalga *Scenedesmus obliquus* BR003 followed by lipid extraction of the wet deproteinized biomass using hexane and ethyl acetate [J]. Bioresource Technology, 2020, 307: 123190-123199.
- [17] 王海英, 牟晓庆. 城市污水培养富油蛋白小球藻的研究[J]. 中南民族大学学报自然科学版, 2011, 30(3): 38-41.
- WANG Haiying, MOU Xiaoqing. Cultivation of high oil content *Chlorella pyrenoidosa* on urban sewage [J]. Journal of South-Central University Natural Science, 2011, 30(3): 38-41. (in Chinese)

【中文责编: 坪梓; 英文责编: 远鹏】