

李昊东, 丁照杰, 孙慧娣, 等. 微藻资源化处理市政污水的试验[J]. 净水技术, 2025, 44(10): 92-99.

LI H D, DING Z J, SUN H D, et al. Experiment of municipal wastewater treatment with microalgae resources utilization[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(10): 92-99.

微藻资源化处理市政污水的试验

李昊东¹, 丁照杰², 孙慧娣¹, 罗世凤¹, 刘长青¹, 赵方超^{1,*}

(1. 青岛理工大学环境与市政工程学院, 山东青岛 266520; 2. 青岛崂湾水务有限公司, 山东青岛 266105)

摘要 【目的】近年来,微藻在污水生物处理方面的研究引起越来越广泛的关注,但相关研究大多采用人工合成的污水。本研究选用青岛市某市政污水处理厂的初沉池和二沉池出水以及污泥消化液对小球藻进行驯化培养,研究小球藻在不同污水中的生长趋势、油脂积累,同时研究3种污水中COD、氮、磷等污染物的去除效果。【方法】采用污泥消化液、初沉池及二沉池出水3种市政污水处理厂污水培养蛋白核小球藻,对小球藻生长情况以及污染物处理效果进行研究。通过新驯化,小球藻在初沉池出水、二沉池出水以及污泥消化液中均能够生长。【结果】初沉池出水、二沉池出水、污泥消化液中总氮去除率分别可达99.5%、80.3%、82.3%,出水质量浓度分别为0.25、6.00、57.80 mg/L;总磷去除率分别可达97.4%、85.5%、80.0%,总磷出水质量浓度分别为0.15、0.08、0.50 mg/L。培养初期,COD浓度明显降低,随着培养进行,胞外有机物及胞内聚合物浓度不断升高,导致COD浓度有所上升。【结论】蛋白核小球藻可在初沉池和二沉池出水以及污泥消化液中培养,并积累丰富的油脂,同时对氮、磷元素具有良好的吸收去除效果。

关键词 小球藻 污水处理 初沉池出水 二沉池出水 污泥消化液

中图分类号: X703 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)10-0092-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.10.010

Experiment of Municipal Wastewater Treatment with Microalgae Resources Utilization

LI Haodong¹, DING Zhaojie², SUN Huidi¹, LUO Shifeng¹, LIU Changqing¹, ZHAO Fangchao^{1,*}

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China;

2. Qingdao Laowan Water Co., Ltd., Qingdao 266105, China)

Abstract [Objective] In recent years, research on the application of microalgae in biological wastewater treatment has attracted increasing widespread attention. However, most of the relevant studies have used artificially synthesized wastewater. In this study, the effluents from the primary sedimentation tank and secondary sedimentation tank of a municipal wastewater treatment plant (WWTP) in Qingdao, as well as the sludge digestion solution, are selected for the acclimatization and cultivation of *Chlorella pyrenoidosa*. The growth trends and lipid accumulation of *Chlorella pyrenoidosa* in different types of wastewater are investigated, and meanwhile, the removal effects of pollutants such as COD, nitrogen, and phosphorus in the three kinds of wastewater are studied. [Methods] The *Chlorella pyrenoidosa* was cultured from three types of wastewater in the municipal WWTP namely sludge digestion liquid, effluent from the primary and secondary sedimentation tank. The growth of microalgae and the treatment effect of contaminant were carried out. The result showed that *Chlorella pyrenoidosa* could grow in the three kinds of wastewater. [Results] The removal rates of total nitrogen in the effluent of the primary and secondary sedimentation tank, and the sludge digestion solution was 99.5%, 80.3%, and 82.3%, respectively, and the mass concentration in effluent was 0.25, 6.00, 57.80 mg/L, respectively; the total phosphorus removal rate could reach 97.4%, 85.5%, 80.0%, and the concentration of total phosphorus in the effluent was 0.15, 0.08, 0.50 mg/L, respectively. At the early stage of the cultivation, the content of COD significantly reduced, and the concentration of extracellular organic matter and intracellular polymer increased as the culture progressed, causing an increase in the COD concentration.

[收稿日期] 2024-05-09

[基金项目] 山东省自然科学基金博士基金(ZR2019BEE028)

[作者简介] 李昊东(1998—),男,硕士研究生,研究方向为污水处理及资源化,E-mail:1452144053@qq.com。

[通信作者] 赵方超(1987—),男,副教授,研究方向为污水处理及资源化,E-mail:zfcsh2013@126.com。

[**Conclusion**] *Chlorella pyrenoidosa* can be cultivated in the effluents from primary sedimentation tanks and secondary sedimentation tanks as well as in sludge digestion liquid. It accumulates abundant lipids while exhibiting excellent absorption and removal effects on nitrogen and phosphorus elements.

Keywords *Chlorella pyrenoidosa* wastewater treatment effluent of primary sedimentation tank effluent of secondary sedimentation tank sludge digestion liquid

地球表面虽近 70% 被水覆盖, 但淡水资源不足 3%。由于淡水稀缺, 污水处理以及水的可持续利用一直是人们所关注的重要方向。污水处理主要采用物理、化学和生物等方式, 包括混凝、絮凝、过滤、光催化、电催化及活性污泥等。然而, 这些工艺能耗大、成本高、环保性差。此外, 传统污水处理过程中存在碳源和絮凝剂投加大、耗电量巨大等资源浪费问题, 会产生剩余污泥和温室气体 CO_2 等副产物, 造成二次污染。

许多藻类, 比如小球藻等已被证实可以在污水中生长, 并可有效去除污水中污染物^[1-2]。因此, 在生物处理法中除活性污泥外, 藻类生物反应器也作为一种污水处理技术受到了广泛的关注, 也是污水处理中研究热点, 被认为是传统污水处理工艺最有前途的替代方案^[3]。微藻除了可以进行废水处理外, 微藻生物质还可用于动物饲料生产、 CO_2 捕获、燃料电池、化妆品添加剂和生物燃料生产等^[4]。微藻对生长所需的氮、磷等营养物质的吸收能力也很强。微藻在污水中的生长与不同细菌的结合可以协同回收废水中的氨氮、硝态氮和磷酸盐等营养物质, 并有助于减少生物需氧量和化学需氧量 (COD), 同时有助于去除废水中的硝酸盐和磷酸盐^[5-7]。微藻和细菌的协同共生系统可以促进 CO_2 转化为生物质, 并减少温室气体排放^[8-9]。因此, 微藻处理污水技术对“碳达峰、碳中和”目标的达成具有一定的贡献。

一些研究将藻类对磷、氮和氨的去除与 CO_2 的量化固定联系起来。例如, Tarlan 等^[10]报道了利用小球藻处理木质纸浆和造纸工业废水, 研究发现, 藻类可以从纸浆和造纸工业废水中去除高达 58% 的 COD、84% 的色度和 80% 的可吸附有机卤素 (AOX)。Silambarasan 等^[11]采用微藻组合处理生活污水, 结果表明, 微藻联合体在去除生活污水中的营养物质方面具有较大的潜力 (78% ~ 98%)。然而, 最佳微藻培养和生物量生产还需要进一步研究, 以确定其对不同浓度污水的处理适用性和最佳收获

时间。

近年来, 微藻在污水生物处理方面的研究引起越来越广泛的关注, 但相关研究^[12]大多采用人工合成的污水。本研究选用环境适应性强、油脂含量高的蛋白核小球藻, 利用青岛市某市政污水处理厂的初沉池和二沉池出水以及污泥消化液对其进行驯化培养, 研究小球藻在不同污水中的生长趋势、油脂积累, 同时研究 3 种污水中 COD、氮、磷等污染物的去除效果。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 藻种及 Basal 培养基

藻种蛋白核小球藻购买于武汉水生生物研究所, 接种至 Basal 培养基。其中, Basal 培养基: KNO_3 质量浓度为 1 250 mg/L, KH_2PO_4 质量浓度为 1 250 mg/L, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 质量浓度为 1 000 mg/L, 乙二醇四乙酸 (EDTA) 质量浓度为 500 mg/L, H_3BO_3 质量浓度为 114.2 mg/L, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 质量浓度为 111 mg/L, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 质量浓度为 49.8 mg/L, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 质量浓度为 88.2 mg/L, $\text{MnCl}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 质量浓度为 14.2 mg/L, MoO_3 质量浓度为 7.1 mg/L, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 质量浓度为 15.7 mg/L。

1.1.2 废水来源及特性

污水取自青岛市某污水处理厂, 其中初沉池出水 COD、氨氮、总氮、硝态氮、磷酸盐、总磷质量浓度分别为 239、37.5、51.2、1.21、5.5、5.77 mg/L; 二沉池出水 COD、氨氮、总氮、硝态氮、磷酸盐、总磷质量浓度分别为 68.32、6.17、33.21、16.91、0.65、0.78 mg/L; 污泥消化液 COD、氨氮、总氮、硝态氮、磷酸盐、总磷质量浓度分别为 330、186.14、368.63、0.75、1.23、2.95 mg/L。

1.2 试验方法

1.2.1 小球藻的驯化培养

将前期筛选出的蛋白核小球藻接种至培养基然后放置培养箱中, 在 25 $^{\circ}\text{C}$, pH 值 = 6.1, 2 000 ~ 2 500 lux 光照条件下, 按光照时间和无光照时间分

别为 14 h 和 10 h 进行连续培养。将培养至对数生长期的小球藻按藻种与污水体积比为 4 : 6 接种到污泥消化液中,培养数天生长至对数期,然后按藻种 : 污水 = 2 : 8 再次接种到消化液中,之后再培养数天至对数期,再按藻种与污水体积比为 1 : 9 接种到初沉池出水、二沉池出水、污泥消化液 3 种污水中。随后将 3 种污水驯化的藻种多次接入各自污水以提高小球藻的环境适应性,最后开始正式培养试验,培养周期为 14 d。

1.2.2 分析检测方法

(1) 藻细胞干重(DM)

小球藻的生长情况用 DM 表示,每天取藻液测试 DM,测试 3 个平行样。将纯种培养下稳定期的微藻稀释成不同倍数,用分光光度计在 680 nm 下分别测其的吸光度;取离心管将所稀释藻液在 3 000 r/min 离心 20 min,去上清液,烘干至恒重,测得 DM,然后计算吸光度和干重标准曲线。DM 由式(1)计算。

$$D = 0.657 \times O_{680} - 0.0843 \quad (1)$$

其中: D ——DM 值, g/L;

O_{680} ——680 nm 波长下测得的吸光度值。

(2) 水质检测

将藻液在 4 000 r/min 下离心 2 min,上清液采用 0.45 μm 滤膜过滤,然后测定其中的氨氮、总氮、硝态氮、磷酸盐、总磷、COD。氨氮的检测方法为纳氏试剂分光光度法;总氮的检测方法为过硫酸钾分光光度法;磷酸根的检测方法为钼酸铵分光光度法;总磷的检测方法为钼酸铵分光光度法;COD 的检测方法为重铬酸钾消解法。

(3) 小球藻油脂测定

将藻液放入 50 mL 离心管中,在 8 000 r/min 下离心 2 min,上清液弃掉,清洗沉淀藻泥,随后将藻泥

置于真空冷冻干燥机中 24 h,最后将冷冻藻粉研磨至粉末状。称取质量 M_1 (约 30 mg) 藻粉至试管,加入体积比为 3 : 1 的氯仿甲醇混合溶液 3 mL,试管放入摇床,在无光照环境 120 r/min 下振荡 12 h。振荡结束,将试管放入离心机在 8 000 r/min 下离心 1 min,将上清液移至新管中,向剩余藻渣中加入 1.5 mL 氯仿甲醇混合液,采用 500 W 超声仪,在冰浴条件下设置超声 2 s,停 4 s,运行 15 min,随后在 8 000 r/min 下离心 5 min,再将其上清液移至新管中,随后加入甲醇 1.5 mL,9% 生理盐水 2.7 mL,取出氯仿层(底层)放至质量为 M_2 (单位为 mg) 的试管,在氮吹 60 $^{\circ}\text{C}$ 下烘 12 h,取出冷却至室温后称其质量为 M_3 (单位为 mg),微藻油脂总质量即为 $M_3 - M_2$,进而求得油脂含量,如式(2)。

$$F = \frac{M_3 - M_2}{M_1} \times 100\% \quad (2)$$

其中: F ——油脂质量分数。

1.2.3 数据分析

每组设置 3 个平行组,试验数据用均值 $\pm$ 标准差($n=3$)表示,用 Origin 2021 和 SPSS 27.0 对所得数据进行作图和数据处理。

2 结果与讨论

2.1 小球藻在 3 种污水中的生长趋势

小球藻在 3 种污水中的生长趋势如图 1 所示。小球藻在初沉池出水中培养至第 11 d 时,DM 约为 0.70 g/L,增长量约为 0.65 g/L,比第 1 d 提高了 10.8 倍,11 d 后小球藻生长趋势开始下降。虽然二沉池出水中营养物元素浓度较低,但小球藻可以快速生长,在第 4 d 微藻质量浓度达到最大,约为 0.70 g/L,和初沉池出水所培养微藻增长量几乎一致,但是生长时间明显减低。污泥消化液营养元素最为丰富,所以培养的小球藻长势最好。在设定的 2 周试

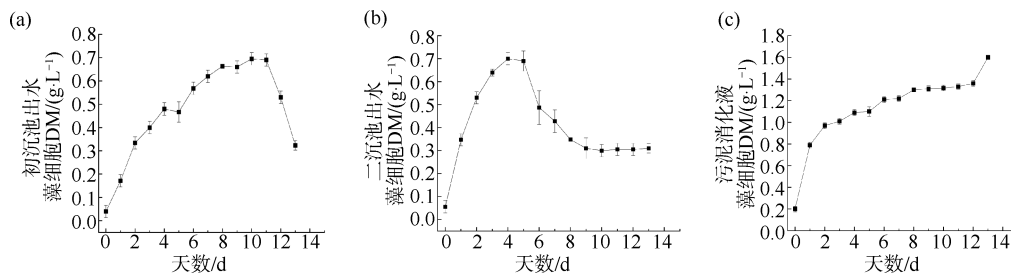


图 1 微藻在 3 种污水培养过程中生长趋势

Fig. 1 Growth Tendency of Microalgae Cultivated in Three Types of Wastewater

验时间内一直稳步增长,在培养试验最后 1 d(第 14 d),DM 约为 1.6 g/L,增长量接近 1.4 g/L。统计分析表明,小球藻 DM 在 3 种污水中均有显著性差异。试验结果表明,小球藻在污泥消化液中获得最高生物量,这是由于消化液中营养元素含量高,小球藻具有较长的生长期。

2.2 小球藻油脂积累

在本试验中,对培养过程中藻细胞油脂含量进行粗测,在 2 周的培养时间内油脂测试时间点分别为培养第 1、4、7 d 以及第 14 d,如表 1 所示。在培养 14 d 内 3 种微藻油脂含量均出现先下降然后再升高的趋势。培养前期油脂含量下降可能是由接种初期生长环境变化引起的,在微藻适应后油脂含量

又逐渐恢复^[13]。随着微藻的培养,初沉池和二沉池藻液中的营养元素逐渐被微藻吸收,在生长末期营养元素的降低促进了微藻油脂的积累,所以油脂含量明显高于接种时^[14-15]。消化液中营养元素含量丰富,在培养期内一直处于生长期,油脂含量并没有恢复至接种时的水平。虽然二沉池出水培养的微藻油脂质量分数最高(21.21%),但二沉池出水营养元素含量低,导致微藻生物量较低,最终所收获总油脂量也较低。消化液中营养元素含量最高,培养微藻生物量最高,因此最终所收获总油脂量最高。培养至第 14 d 时,初沉池和二沉池出水培养的小球藻油脂质量浓度约为 0.07 g/L、消化液培养小球藻油脂质量浓度约为 0.24 g/L。

表 1 微藻油脂含量变化
Tab. 1 Change of Oil Contents in Microalgae

项目	藻细胞含油率			
	第 1 d	第 4 d	第 7 d	第 14 d
初沉池	18.52%±1.25%	14.43%±0.65%	17.13%±0.90%	20.72%±1.50%
二沉池	19.38%±1.12%	16.53%±0.71%	18.76%±0.95%	21.21%±1.10%
消化液	16.21%±0.87%	13.61%±0.66%	14.93%±0.87%	15.43%±0.99%

2.3 小球藻对污水中氮的去除效果

2.3.1 氨氮去除效果

微藻在 3 种污水培养过程中氨氮含量变化曲线如图 2 所示。在初沉池出水培养小球藻的 14 d 内,藻液中氨氮含量一直在减少,接种时氨氮质量浓度为 35.20 mg/L 左右,2 周后氨氮质量浓度仅为 0.25 mg/L,去除率高达 99.3%。小球藻在二沉池出水培养至第 3 d 时,氨氮质量浓度由 5.90 mg/L 降至 0.32 mg/L,去除率为 94.6%,之后出现先上

升再降低的趋势,氨氮质量浓度上升可能是污水中营养元素缺乏微藻死亡导致氮元素被再次释放至藻液。消化液中氨氮含量总体表现为下降趋势,小球藻培养 2 周后,氨氮质量浓度由 161.1 mg/L 降至 20.8 mg/L,去除率可达 87.1%。统计分析表明,小球藻对 3 种污水中氨氮去除率具有显著差异。由图 2 可知,小球藻对 3 种污水中氨氮均有较好的去除效果,对初沉池出水去除率可达 99.3%,效果最佳。

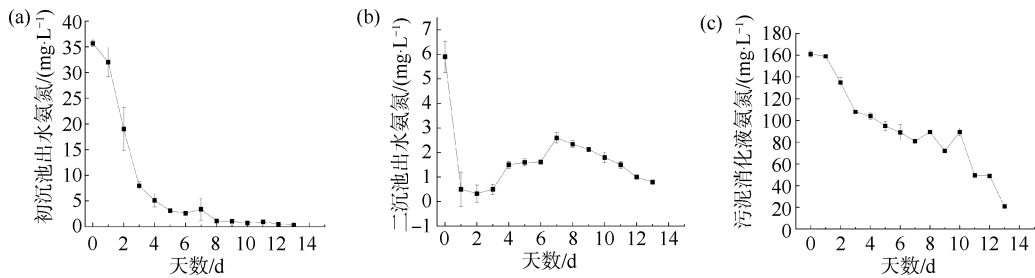


图 2 污水中氨氮变化趋势
Fig. 2 Variation Trend of Ammonia Nitrogen in Wastewater

2.3.2 总氮去除效果

3 种污水在微藻培养过程中总氮质量浓度变化如图 3 所示。微藻在生长过程中会优先吸收藻液中的氨氮,在微藻生长前期总氮变化规律均同氨氮基本

一致,因此,在此阶段总氮质量浓度的减少主要归咎于氨氮质量浓度的减少^[16]。初沉池出水和二沉池出水中总氮初始质量浓度为 45.5 mg/L 和 30.6 mg/L、消化液总氮质量浓度明显高于前 2 种污水,约为

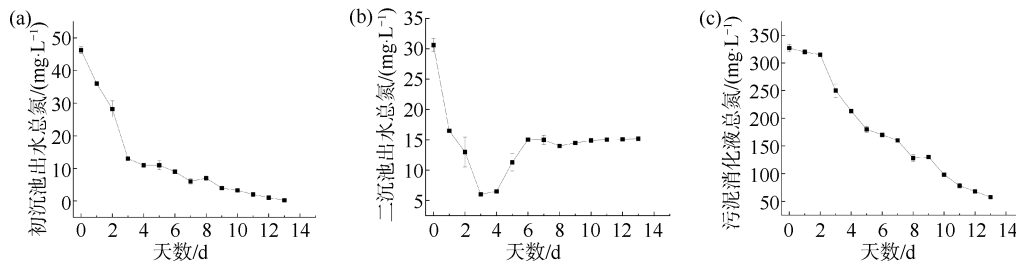


图3 污水中总氮变化趋势

Fig. 3 Variation Trend of Total Nitrogen in Wastewater

326.9 mg/L。微藻在初沉池出水培养前4 d,总氮质量浓度降低较为迅速,第4 d时,总氮质量浓度降为13 mg/L,去除率接近71.4%;培养2周后,总氮质量浓度不足0.25 mg/L,去除率高达99.5%。对于二沉池出水,前4 d总氮质量浓度不断减少,此时总氮质量浓度降至6.00 mg/L,去除率约为80.3%。微藻在消化液培养过程中,总氮质量浓度不断降低,培养14 d后,总氮质量浓度为57.80 mg/L,去除率约为82.3%。统计分析表明,小球藻对3种污水中总氮均有较高去除率。小球藻对3种污水中总氮均有较好的去除效果,对初沉池出水去除率可达99.5%,效果最佳。

2.3.3 不同污水氮的去除动力学研究

将小球藻在不同污水对于氨氮、总氮的去除过

程进行准一级动力学、准二级动力学研究。由于二沉池出水除氮过程表现为浓度先下降后上升的趋势,情况较为复杂,进行动力学研究时不能很好地进行拟合,因此本次除氮动力学研究仅对初沉池出水和污泥消化液进行脱氮动力学拟合。如图4、图5所示,准二级反应动力学方程可以较好地拟合不同污水对氨氮、总氮的去除过程,能够通过动力学方程较好地计算小球藻对不同污水中氨氮、总氮的去除效果。并且对于污水处理时的脱氮反应速率常数进行了拟合计算,初沉池出水和污泥消化液的去除氨氮的反应速率常数分别为0.021 26和0.001 87;去除总氮的反应速率常数分别为0.180 1和0.001 02。进一步体现了微藻在不同污水中的处理效果。

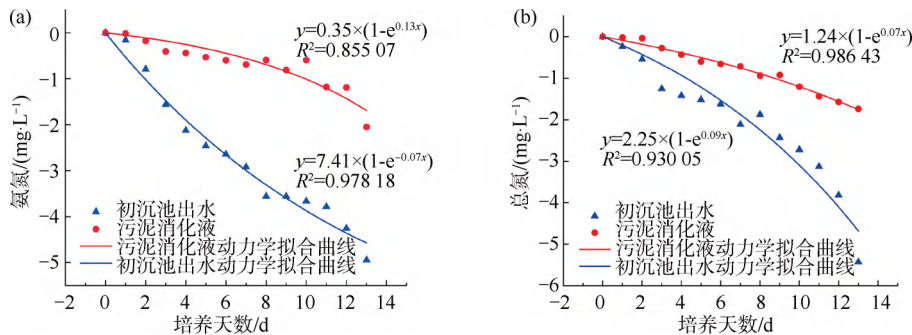


图4 准一级反应动力学参数拟合曲线

Fig. 4 Fitting Curve of Quasi-First-Order Reaction Kinetic Equation

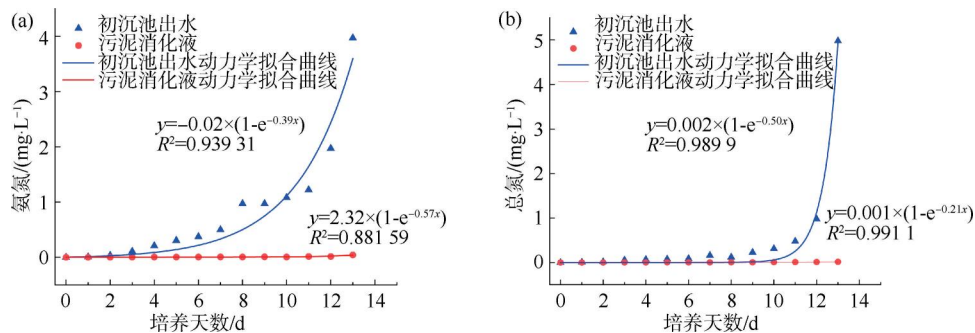


图5 准二级反应动力学参数拟合曲线

Fig. 5 Fitting Curves of Parameters Quasi-Second-Order Reaction Kinetic Equation

2.4 小球藻对3种污水中磷的去除效果

2.4.1 磷酸盐去除效果

如图6所示,小球藻在3种污水培养过程中,对磷酸盐均具有较好的处理效果。在培养前3 d,3种污水均达到较好的处理效果,尤其是初沉池和二沉池出水,磷酸盐质量浓度分别从4.70 mg/L和0.49 mg/L降为0.08 mg/L和0.04 mg/L,去除率均超过

了90%,分别是98.3%和91.8%。消化液中磷酸盐由1.33 mg/L降为0.26 mg/L,去除率约为80.5%,培养2周后,磷酸盐质量浓度约为0.10 mg/L,去除率近92%。一般污泥消化液中磷酸盐及总磷质量浓度都较高,但本试验所选污泥消化液在污水处理厂已然经过了化学除磷,导致磷酸盐和总磷质量浓度较低。

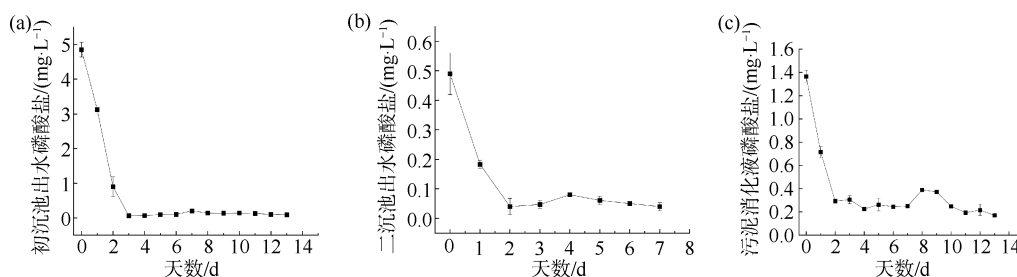


图6 污水中磷酸盐变化趋势

Fig. 6 Variation Trend of Phosphate in Wastewater

2.4.2 总磷去除效果

小球藻在初沉池、二沉池出水以及消化液培养过程中,总磷质量浓度变化趋势如图7所示。在初沉池出水和消化液中生长,小球藻对总磷的吸收利用效果相对更好。同磷酸盐去除过程相似,在培养前3 d,3种污水中总磷质量浓度大幅降低:初沉池出水总磷质量浓度由5.67 mg/L降为0.15 mg/L,去除率超过了97.0%;消化液中总磷质量浓度由2.5 mg/L降至0.50 mg/L以下,去除率接近80.0%,

但在培养结束时消化液中总磷去除率也未超过90%;二沉池出水中总磷质量浓度由0.55 mg/L降至0.08 mg/L,去除率为85.5%,但随后质量浓度略有升高。二沉池出水中营养元素含量少,微藻生长时间较短,接种4 d后便停止生长,随后甚至出现微藻死亡裂解,由于藻细胞对含磷化合物有吸附沉降效果,当藻细胞死亡时,固定在胞内或被吸附在胞外的含磷化合物被重新释放到藻液中,从而导致二沉池出水的藻液总磷质量浓度升高^[17-19]。

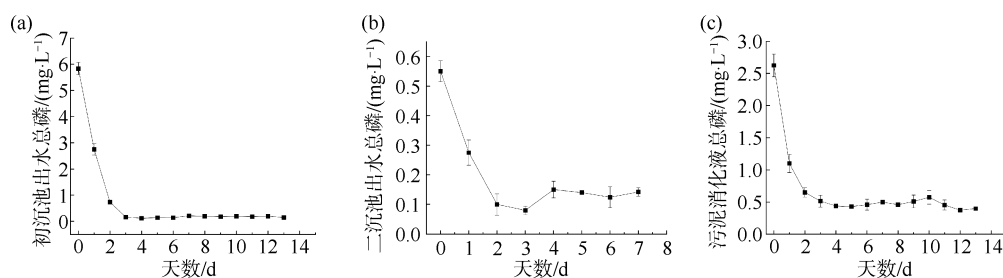


图7 污水中总磷变化趋势

Fig. 7 Variation Trend of Total Phosphorus in Wastewater

2.4.3 不同污水磷的去除动力学研究

将小球藻在不同污水对于磷酸盐、总磷的去除过程进行准一级动力学研究。如图8所示,准一级反应动力学方程可以较好地拟合不同污水对磷酸盐、总磷的去除过程,能够通过动力学方程较好地计算小球藻对不同污水中磷酸盐、总磷的去除效果。

2.5 小球藻对COD的去除效果

小球藻是兼性混合培养微生物,在一些小分子有机物存在的条件下,会优先利用有机物进行异养生长,且生长速率会明显加快。如图9所示,3种污水中COD在接种初期被小球藻大量吸收,因此下降趋势较快,但随后COD质量浓度基本表现为上升趋势,所以本研究对COD的监测只做了9 d。

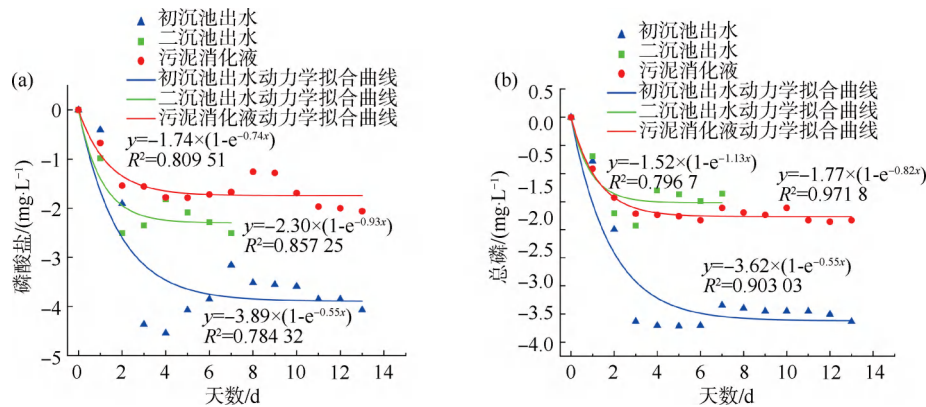


图8 准一级反应动力学参数拟合曲线

Fig. 8 Fitting Curves of Parameters Quasi-First-Order Reaction Kinetic Equation

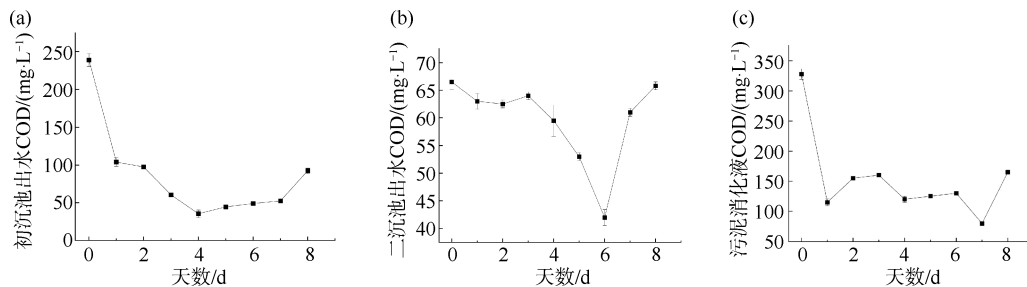


图9 污水中 COD 变化趋势

Fig. 9 Variation Trend of COD in Wastewater

在接种初期,初沉池出水 COD 质量浓度为 233 mg/L,培养至第 4 d 质量浓度为 32 mg/L,去除率为 86.3%。微藻在二沉池出水培养 6 d 后去除率达到最高,但也仅为 37.1%,质量浓度约为 42 mg/L。消化液中 COD 质量浓度在微藻培养第 1 d 后明显降低,由 328 mg/L 降至 115 mg/L 左右,说明有机物被微藻大量吸收,但随后波动较大,在 9 d 的培养过程中,最高去除率超过了 75%。在微藻培养初期有机物质量浓度明显下降,主要原因是被微藻当作有机碳源吸收,但是随着小球藻的培养,其分泌的胞外有机物及藻细胞死亡、裂解释放的胞内有机物速率超过了微藻生长所消耗有机物的速率,从而导致培养后期藻液中 COD 质量浓度升高^[20]。

3 结论

通过本研究可知,蛋白核小球藻可在初沉池和二沉池出水以及污泥消化液中培养,并积累丰富的油脂,同时对氮、磷元素具有良好的吸收去除效果。

二沉池出水中营养元素质量浓度低,接种培养 4 d 后小球藻便停止生长,在培养的第 4 d 时,其中的总氮和总磷质量浓度分别为 6.00 mg/L 和 0.08

mg/L,去除率为 80.3% 和 85.5%,出水浓度远远低于一级 A 排放标准。因此,蛋白核小球藻在三级处理方面具有一定的潜力。虽然蛋白核小球藻在 3 种污水中培养时对 COD 均有一定的吸收去除效果,但在实际污水处理中应根据实际情况选择合适的培养周期。本试验仅限于实验室规模,并且一些微藻培养体系工艺扩大到工业规模后,稳定性有所不同,在实际运行条件下,其处理工艺的经济性能仍需研究。

参考文献

- [1] GARCÍA D, POSADAS E, BLANCO S, et al. Evaluation of the dynamics of microalgae population structure and process performance during piggy wastewater treatment in algal-bacterial photobioreactors [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 248: 2018. DOI:10.1016/j.biortech.2017.06.079.
- [2] 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.
LI Y. Research progress on treatment of sewage by microalgae [J]. *Water Resources Development and Management*, 2020 (8): 13-18.
- [3] LIU Y B, ZHANG G Y, LI W R, et al. The characteristic evolution and formation mechanism of hybrid microalgae biofilm

- and its application in mariculture wastewater treatment [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2023, 11(3): 109645.
- [4] 杨黎彬, 周雪飞, 张亚雷, 等. 产油微藻培养与回收的关键技术研究进展[J]. 环境污染与防治, 2013, 35(9): 82-87. YANG L B, ZHOU X F, ZHANG Y L, et al. Discussion of key techniques of cultivation and harvesting of oleaginous microalgae [J]. Environmental Pollution & Control, 2013, 35(9): 82-87.
- [5] GAO F, PENG Y Y, LI C, et al. Coupled nutrient removal from secondary effluent and algal biomass production in membrane photobioreactor (MPBR): Effect of HRT and long-term operation [J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 335: 169-175. DOI:10.1016/j.cej.2017.10.151.
- [6] TSAVALOS A J, DAY J G. Development of media for the mixotrophic/heterotrophic culture of *Brachiomonas submarina* [J]. Journal of Applied Phycology, 1994, 6: 431-433. DOI: 10.1007/bf02182162.
- [7] 朱新曼, 尹儿琴, 刘友春, 等. 微藻处理污水的可行性研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2019, 50(3): 509-512. ZHU X M, YIN E Q, LIU Y C, et al. Study on the feasibility treating wastewater by *Chlamydomonas reinhardtii* [J]. Journal of Shandong Agriculture University (Nature Science Edition), 2019, 50(3): 509-512.
- [8] XU H, MIAO X L, WU Q Y. High quality biodiesel production from a microalga *Chlorella protothecoides* by heterotrophic growth in fermenters [J]. Journal of Biotechnology, 2006, 126(4): 499-507.
- [9] GUTIÉRREZ R, FERRER I, GONZÁLEZ-MOLINA A, SALVADÓ H, et al. Microalgae recycling improves biomass recovery from wastewater treatment high rate algal ponds [J]. Water Research, 2016, 106: 539-549. DOI: 10.1016/j.watres.2016.10.039.
- [10] TARLAN E, DILEK F B, YETIS U. Effectiveness of algae in the treatment of a wood-based pulp and paper industry wastewater [J]. 2002, 84(1): 1-5.
- [11] SILAMBARASAN S, LOGESWARI P, SIVARAMAKRISHNAN R. Removal of nutrients from domestic wastewater by microalgae coupled to lipid augmentation for biodiesel production and influence of deoiled algal biomass as biofertilizer for *Solanum lycopersicum* cultivation [J]. 2020, 268: 129323. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.129323.
- [12] 陈凡雨, 徐仲, 尤宏, 等. 缺氧 MBR-MMR 处理海水养殖废水性能及膜污染特性[J]. 环境科学, 2020, 41(6): 2762-2770. CHEN F Y, XU Z, YOU H, et al. Performance and membrane fouling characteristics of mariculture wastewater treated by anoxic MBR-MMR [J]. Environmental Science, 2020, 41(6): 2762-2770.
- [13] 肖雪花, 占凌云, 戴静璇, 等. 培养条件对蛋白核小球藻生长及油脂合成的影响[J]. 中国油脂, 2021, 46(1): 132-136. XIAO X H, ZHAN L Y, DAI J X, et al. Effects of culture condition on the growth and oil synthesis of *Chlorella pyrenoidosa* [J]. China Oils and Fats, 2021, 46(1): 132-136.
- [14] FENG P Z, DENG Z Y, HU Z Y, et al. Lipid accumulation and growth of *Chlorella zofingiensis* in flat plate photobioreactors outdoors [J]. Bioresource Technology, 2011, 102(22): 10577-10584.
- [15] 樊婷婷, 李娜, 郭天鹏, 等. 不同废水培养小球藻提取生物柴油的营养优化研究[J]. 中国给水排水, 2017, 33(5): 76-79. FAN T T, LI N, GUO T P, et al. Nutrition optimization research on cultivating *Chlorella vulgaris* as biodiesel feedstock by different types of wastewater [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(5): 76-79.
- [16] 项彦仪. 基于小球藻培养的市政污水处理研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2017. XIANG J Y. Studies on treatment of municipal wastewater based on *Chlorella zofingiensis* culture [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2017.
- [17] 沈俏会. 基于产油微藻的污水深度处理及过程调控[D]. 杭州: 浙江大学, 2015. SHEN Q H. Process regulation of wastewater advanced treatment by oleaginous microalgae [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [18] 韩厚峰. 微藻快速除磷影响因素及除磷途径研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2020. HAN H F. Research on influencing factors and pathways of phosphorus removal by two microalgae [D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2020.
- [19] Murwnashyaka Theophile. 微藻异养培养用于废水脱氮除磷的研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2018. THEOPHILE M. Exploration on heterotrophic cultivation of microalgae for nutrients removal from wastewater [D]. Xiamen: Xiamen University, 2018.
- [20] 颜志娇. 小球藻对生活污水氮磷及有机物去除效应研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2020. YAN Z J. Study on the removal effect of *Chlorella pyrenoidosa* on nitrogen, phosphorus and organic matter in domestic sewage [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020.