

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.07.013

耐盐微藻处理高盐食品加工废水协同产脂肪酸研究

胡昊^{1,2}, 马融¹, 武思¹, 吴邦磊¹, 李正浩³, 李振刚⁴,
黄显怀^{1,2}

(1. 安徽建筑大学 环境与能源工程学院, 安徽 合肥 230601; 2. 安徽省环境污染控制与资源化重点实验室, 安徽 合肥 230601; 3. 中国科学技术大学 环境科学与工程系, 安徽 合肥 230026; 4. 阜阳市供水有限公司, 安徽 阜阳 236069)

摘要: 采用耐盐微藻处理高盐食品加工废水协同脂肪酸产出具有很好的应用前景,然而不同耐盐藻种在高盐食品加工废水资源化处理中的性能差异较大。基于此,探讨了微拟球藻、三角褐指藻和球等鞭金藻三种微藻在不同乳酸钠浓度下的生长表现、污染物去除效率和脂肪酸的产出潜能。结果表明,当乳酸钠浓度为2.540 g/L时,三种微藻均表现出最佳生长状态,其中三角褐指藻的生物量最高(1.59 g/L)。三角褐指藻对污染物去除效果最优,氨氮和硝态氮去除率在培养第2天分别达到79%和99%,最终分别达到72%和99%, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和乳酸钠去除率均为100%。微拟球藻和三角褐指藻的脂肪酸分别占干细胞总量的37.31%和36.85%,其中不饱和脂肪酸分别占总脂肪酸的54%和48%。综合表明,三角褐指藻去除高盐食品加工废水污染物协同资源化产出性能优越,为高盐食品加工废水资源化处理技术提供了应用基础。

关键词: 耐盐微藻; 高盐食品加工废水; 脂肪酸; 乳酸钠; 资源化

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)07-0086-07

Treatment of High-salinity Food Processing Wastewater by Salt-tolerant Microalgae for Fatty Acid Production

HU Hao^{1,2}, MA Rong¹, WU Si¹, WU Banglei¹, LI Zhenghao³, LI Zhengang⁴,
HUANG Xianhuai^{1,2}

(1. School of Environmental and Energy Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601 China; 2. Anhui Provincial Key Laboratory of Environmental Pollution Control and Resource Reuse, Hefei 230601, China; 3. Department of Environmental Science and Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 4. Fuyang City Water Supply Co. Ltd., Fuyang 236069, China)

Abstract: The application of salt-tolerant microalgae for the treatment of high-salinity food processing wastewater coupled with fatty acid production holds significant promise. However, the performance of different salt-tolerant microalgae species in the resource-oriented treatment of such wastewater varies considerably. This study investigated the growth performance, pollutants removal

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3205705); 国家自然科学基金资助项目(52370001); 安徽省省级质量工程项目(2023xjzlt033); 企业资助课题(HYB20250036)

通信作者: 黄显怀 E-mail: 2770226757@qq.com

efficiency, and fatty acid production potential of three microalgae species—*Nannochloropsis oceanica*, *Phaeodactylum tricornutum*, and *Isochrysis galbana*—under varying concentrations of sodium lactate. The results showed that all three microalgae exhibited optimal growth at a sodium lactate concentration of 2.540 g/L, with *Phaeodactylum tricornutum* achieving the highest biomass (1.59 g/L). *Phaeodactylum tricornutum* demonstrated the most efficient pollutant removal, achieving ammonia nitrogen and nitrate nitrogen removal rates of 79% and 99%, respectively, by the second day of cultivation, with final removal rates reaching 72% and 99%, respectively. The removal rates for both $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ and sodium lactate reached 100% by the end of the experiment. The fatty acid contents of *Nannochloropsis oceanica* and *Phaeodactylum tricornutum* were 37.31% and 36.85% of cell dry weight, with unsaturated fatty acids accounting for 54% and 48% of the total fatty acids, respectively. Collectively, these findings indicate that *Phaeodactylum tricornutum* exhibits superior performance in pollutants removal and resource recovery from high-salinity food processing wastewater, providing a foundation for the application of resource-oriented treatment technologies for high-salinity wastewater.

Keywords: salt-tolerant microalgae; high-salinity food processing wastewater; fatty acid; sodium lactate; resource recovery

腌制咸菜、酱类食品生产、海产品加工等食品行业产生的废水含盐量达1%以上,且有机质浓度高($\text{COD}>5\,000\text{ mg/L}$)^[1],被称为“高盐食品加工废水”。近年来,该类废水产量不断增加,由于盐度和有机质浓度较高,其处理难度较大,但是合理处置该类废水又具有极高的资源化价值。目前主要采用电渗析或蒸发结晶等手段回收盐类,但这种资源化处理手段往往成本较高。利用生物法转化污染物产出高附加值产物能耗低、经济效益好,但是找到适宜的耐盐微生物成为难点^[2]。已有科研人员通过驯化耐盐微藻处理酱油废水并产出脂肪酸(生物柴油)^[3]。值得注意的是,该研究需要通过稀释酱油废水以调节盐度至小球藻耐受范围,而本研究通过筛选耐盐微藻,直接对未稀释的合成高盐食品加工废水进行处理,可为不同盐度下的废水处理提供更为普适的解决方案。

实际上有一类耐盐微藻生长在高盐度环境中,加以驯化可使其具有很高的耐盐特性;耐盐微藻在利用高盐食品加工废水生长的同时,其本身就是资源化产品的原料。因此,利用耐盐微藻处理高盐食品加工废水协同产脂肪酸,是实现该类废水资源化的一种新思路。然而,耐盐微藻种类繁多,且对不同有机物浓度高盐食品加工废水的适应性不同,污染物处理能力和脂肪酸产量也不尽相同,对于不同乳酸钠浓度的高盐食品加工废水应该如何选取耐

盐微藻,目前尚不清楚。因此,笔者根据文献调研和前期实验选定了三种耐盐微藻作为研究对象,考察了三种耐盐微藻对不同乳酸钠浓度高盐食品加工废水的耐受性和污染物去除协同产脂肪酸性能。

1 材料与方法

1.1 高盐食品加工废水组分

实验合成废水以腌制食品厂废水水质指标^[4]为基础,并结合合肥市某腌制食品厂原水水质实测指标,设定盐度为4.29%,设定乳酸钠作为高盐食品加工废水的代表性有机质。合成高盐食品加工废水主要物质浓度如下:氯化钠(NaCl)为23.7 g/L,乳酸钠($\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3\text{Na}$)为2.54 g/L,六水合氯化镁($\text{MgCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$)为9.59 g/L,硫酸钠(Na_2SO_4)为3.55 g/L,氯化钙(CaCl_2)为1.01 g/L,氯化铵(NH_4Cl)为458.56 mg/L,二水合磷酸二氢钠($\text{NaH}_2\text{PO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$)为251.61 mg/L,硝酸钠(NaNO_3)为1 821.42 mg/L。

1.2 耐盐藻种及实验设置

实验使用的微拟球藻(*Nannochloropsis oceanica* CCMP 1779)、三角褐指藻(*Phaeodactylum tricornutum* CCAP 1055/1)、球等鞭金藻(*Isochrysis galbana* 3011)均购自上海光语生物科技有限公司。

以1 L锥形瓶为培养容器,每瓶加入800 mL培养液,培养液中乳酸钠浓度分别为0、0.635、1.270和2.540 g/L,每个浓度设3个平行,微藻初始接种生物量为0.5 g/L。采用白光照射,光强为 (70 ± 5)

$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 光暗比为 12 h:12 h。为监测光暗条件对微藻的影响, 取样分为长、短周期, 长周期为第 0、2、4、6、8 天, 每天 09:00 准时取样; 短周期为第 3 天和第 6 天, 每天从 00:00 开始, 每隔 6 h 取样 1 次。

1.3 分析测试方法

常规水质指标的测定: NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、 $\text{PO}_4^{3--}\text{P}$ 等指标均采用《水和废水监测分析方法》(第 4 版)测定; 叶绿素 a 浓度及生物量的测定与计算参考 Hu 等^[5]的方法。

乳酸钠的测定: 乳酸钠的测定根据 Laube 等^[6]的方法进行改良, 使用高效液相色谱仪测定, 流动相为 5 mmol/L 稀硫酸溶液, 色谱柱为 Aminex HPX-87H (7.8 mm×300 mm), 使用 RID 示差检测器, 柱温为 45 °C, 单次进样量为 20 μL , 流动相的工作流速为 0.5 mL/min。

采用气相色谱仪测定脂肪酸含量, 脂肪酸的提取方法、仪器参数设定和脂肪酸的计算参考 Hu 等^[5]的研究。去除单位污染物的总脂肪酸产率参照文献^[7]计算。参照文献^[8]计算盐度。

2 结果与讨论

2.1 三种耐盐微藻生长适应性

2.1.1 不同有机质浓度下微藻生物量的变化

三种微藻在不同乳酸钠浓度高盐废水中的生物量见表 1。

表 1 三种微藻在不同乳酸钠浓度高盐废水中的生物量
Tab.1 Biomass of three microalgae in high-salinity wastewater with different sodium lactate concentrations

项 目	乳酸钠浓度	生物量				
		0 d	2 d	4 d	6 d	8 d
微拟球藻	0	0.53	0.68	0.70	0.78	0.77
	0.635	0.60	0.80	0.97	1.11	1.19
	1.270	0.59	0.74	0.93	1.42	1.53
	2.540	0.59	0.75	1.05	1.50	1.47
三角褐指藻	0	0.50	0.63	0.60	0.65	0.70
	0.635	0.58	0.87	0.96	1.06	1.14
	1.270	0.58	0.68	1.00	1.21	1.16
	2.540	0.55	1.16	1.35	1.55	1.59
球等鞭金藻	0	0.54	0.56	0.54	0.54	0.55
	0.635	0.55	0.83	0.90	0.91	0.97
	1.270	0.57	0.87	1.01	1.00	1.03
	2.540	0.60	1.06	1.38	1.31	1.31

从表 1 可以看出, 随着乳酸钠浓度升高, 三种微藻的生物量整体上均显著增加, 这说明乳酸钠(有机质)浓度的上升, 促进了生物量增长。在乳酸钠浓度为 2.540 g/L 的条件下三角褐指藻的生物量达到最大, 是未添加乳酸钠组的 2.27 倍, 且高于微拟球藻和球等鞭金藻, 表现出优异的耐盐、耐有机物生长能力。在低乳酸钠浓度下, 微拟球藻生物量最高; 而在高乳酸钠浓度下, 三角褐指藻生物量最高, 这说明三角褐指藻有较强的环境适应性, 更耐受环境中渗透压的变化。

2.1.2 叶绿素 a 的变化

在不同乳酸钠浓度高盐废水中三种微藻的叶绿素 a 浓度变化如图 1 所示。

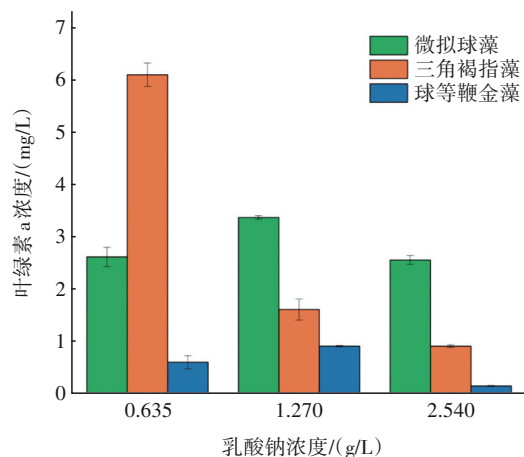


图 1 在不同乳酸钠浓度高盐废水中三种微藻的叶绿素 a 浓度变化

Fig.1 Change in chlorophyll-a concentration of three microalgae in high-salinity wastewater with different sodium lactate concentrations

从图 1 可以看出, 当乳酸钠浓度较低时, 三角褐指藻的叶绿素 a 浓度最高, 达到 6.1 mg/L。随着乳酸钠浓度的增加, 三角褐指藻的叶绿素 a 浓度迅速降至 2.0 mg/L 以下。微拟球藻的叶绿素 a 浓度随着乳酸钠浓度的增加先升高后降低。球等鞭金藻的叶绿素 a 浓度没有明显变化, 基本在 1 mg/L 以下。这些变化反映了不同藻营养方式转变的程度, 三角褐指藻在乳酸钠浓度增大到 1.270 g/L 时, 其叶绿素变化趋势发生突变, 这是由于三角褐指藻迅速转变为混养模式, 叶绿素 a 浓度急剧下降。叶绿素 a 浓度通常被用来与生物量一起反映微藻的生长过程, 而本研究中叶绿素 a 的变化趋势与生物量有所不同。低盐度下, 三角褐指藻的叶绿素 a 浓度最高; 高盐度

下则是微拟球藻的叶绿素 a 浓度最高。根据之前的研究^[9],三角褐指藻的 F_v/F_m 值(光系统 II 最大光化学效率)在 3.5% 盐度下达到最大,在 4.5% 盐度下出现小幅下降。 F_v/F_m 值的下降会直接影响微藻叶绿素的合成,这导致了三角褐指藻在 2.540 g/L 乳酸钠条件下(盐度为 4.29%)叶绿素 a 浓度低于微拟球藻。不同盐度对微藻生长代谢的影响程度不同,这直接反映在叶绿素 a 浓度的变化上。在低盐度条件时,三角褐指藻表现出较高的叶绿素 a 浓度,表明其光合作用效率较高,能够充分利用光能进行生长代谢。然而,随着盐度的升高,三角褐指藻的 F_v/F_m 值开始下降,其光合作用活性受到抑制,叶绿素 a 合成能力也随之降低。

2.2 三种耐盐微藻污染物去除性能分析

2.2.1 对氮的去除效果

长周期内三种微藻对氨氮的去除效果见表 2。

表 2 长周期内三种微藻对氨氮的去除效果

Tab.2 Removal efficiency of ammonia nitrogen by three microalgae in a long period

项 目	乳酸钠浓度/(g/L)	NH ₄ ⁺ -N 浓度/(mg/L)				
		0 d	2 d	4 d	6 d	8 d
微拟球藻	0	124.20	120.97	116.57	113.92	116.85
	0.635	126.09	111.25	80.64	90.01	67.23
	1.270	122.23	116.88	90.21	49.32	32.74
	2.540	126.60	116.88	58.48	57.61	48.04
三角褐指藻	0	121.99	111.25	108.12	101.53	100.45
	0.635	127.90	81.05	78.29	89.19	68.72
	1.270	120.97	98.45	66.72	68.54	67.75
	2.540	122.50	25.27	19.23	39.65	33.87
球等鞭金藻	0	125.06	119.95	111.35	118.95	117.69
	0.635	124.04	87.65	87.65	100.04	88.98
	1.270	125.06	65.70	76.39	97.43	88.37
	2.540	128.13	39.60	47.33	76.19	76.60

从表 2 可以看出,在未添加乳酸钠的条件下,氨氮去除速度非常缓慢。其中,三角褐指藻在培养第 8 天氨氮去除量最大,达 21.54 mg/L,而微拟球藻和球等鞭金藻对氨氮的去除效果几乎可以忽略不计。随着乳酸钠的加入,三种微藻对氨氮的去除效果显著提高,且乳酸钠浓度越高,对氨氮的去除速度越快。当乳酸钠浓度为 2.540 g/L 时,三角褐指藻在培养第 2 天就去除了 97.23 mg/L 的氨氮,去除率达到了 79%。第 6 天氨氮浓度有所回升,但第 8 天仍可达到 72% 的去除率。有学者指出^[10],微藻在衰亡后会将细胞内的物质释放到培养系统中,从而导致去

除率降低。在本研究中,除乳酸钠浓度为 1.270 和 2.540 g/L 的微拟球藻组外,其余所有实验组在培养后期均出现了一定程度的氨氮浓度回升,这也是由于废水中的有机质消耗殆尽后微藻生长变慢,部分微藻细胞开始裂解死亡,氨氮同化变得缓慢,同时有一些氨氮从液泡和细胞质中扩散到培养基内所致。总体而言,三角褐指藻对氨氮的去除效果最佳,在高乳酸钠浓度条件下表现尤为显著。

在培养第 3 天和第 6 天,对处理系统进行了短周期监测(0~12 h 光照,12~24 h 黑暗),结果如图 2 所示。可以看出,三种微藻在这两天内的变化趋势相似:不加乳酸钠组,第 3 天氨氮浓度无显著变化,第 6 天光照条件下氨氮浓度升高,而黑暗条件下则下降;在添加乳酸钠组中,第 3 天表现为光照期间氨氮下降,黑暗期间三角褐指藻和球等鞭金藻的氨氮浓度缓慢回升,而微拟球藻在乳酸钠浓度为 0.635 g/L 和 2.540 g/L 条件下继续下降、在 1.270 g/L 条件下回升;第 6 天的氨氮变化趋势总体上与不加乳酸钠组相近,只有 2.540 g/L 条件下的三角褐指藻的氨氮在黑暗期间缓慢上升。这种现象与微藻在光照和黑暗以及有、无有机物条件下的生长代谢方式有关,光照条件下微藻自养代谢较强,氨氮的同化去除作用较强,黑暗条件下以异养代谢为主,而不加乳酸钠组由于无异养生长的有机物条件,所以生长代谢较慢,氨氮去除效果较差。

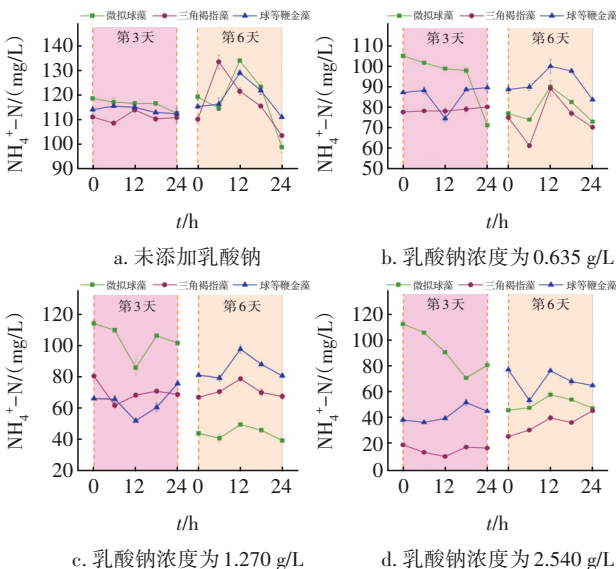


图 2 短周期内三种微藻对氨氮的去除效果

Fig.2 Removal efficiency of ammonia nitrogen by three microalgae in a short period

长周期内三种微藻对硝态氮的去除效果见表 3。可知,三种微藻在长周期下对硝态氮的去除效果存在显著差异。在未添加乳酸钠的条件下,三种微藻对硝态氮的去除作用可以忽略。添加乳酸钠后,对硝态氮的去除效果显著提高,其中三角褐指藻表现最佳。在乳酸钠浓度为 1.270 和 2.540 g/L 条件下,三角褐指藻分别于第 4 天和第 2 天达到了 99% 的去除率,对应的单位微藻去除量分别为 281.23 和 249.15 mg/g。微拟球藻仅在乳酸钠浓度为 2.540 g/L 条件下,于第 6 天去除了近 100% 的硝态氮。球等鞭金藻的表现与微拟球藻相似,仅在乳酸钠浓度为 2.540 g/L 条件下实现了对硝态氮 99% 的去除率。总体而言,三角褐指藻在硝态氮去除方面效果最为显著,其在第 2 天即表现出极高的去除率,展现了优越的硝态氮去除能力。

表 3 长周期内三种微藻对硝态氮的去除效果

Tab.3 Removal efficiency of nitrate nitrogen by three microalgae in a long period

项 目	乳酸钠浓度/(g/L)	NO ₃ ⁻ -N 浓度/(mg/L)				
		0 d	2 d	4 d	6 d	8 d
微拟球藻	0	285.65	283.85	293.45	280.86	279.66
	0.635	291.05	289.63	286.85	279.66	282.05
	1.270	295.85	294.65	281.46	277.26	293.45
	2.540	286.25	285.65	207.70	0.00	1.44
三角褐指藻	0	285.65	263.47	283.25	288.65	285.05
	0.635	284.26	199.91	196.91	201.11	169.33
	1.270	283.25	171.13	2.02	0.24	0.84
	2.540	292.85	3.84	0.00	0.00	0.84
球等鞭金藻	0	283.68	283.25	275.87	281.69	282.65
	0.635	289.25	256.87	241.28	256.27	225.69
	1.270	288.65	215.50	196.91	211.30	214.90
	2.540	292.85	5.63	0.00	1.44	2.04

短周期内三种微藻对硝态氮的去除效果如图 3 所示。未加乳酸钠组未对硝态氮产生去除效果,投加乳酸钠组硝态氮的变化趋势也非常平稳。三角褐指藻在乳酸钠浓度为 0.635 和 1.270 g/L 条件下,第 3 天有光照时对硝态氮去除效果明显,而黑暗条件并没有对硝态氮的去除产生明显影响。有学者发现^[11],全天(24 h)光照可有效提升栅藻对水产养殖废水中硝态氮的去除率,硝态氮去除率随光照时间的增加而升高。因此可以假设,光合作用产生的还原力(NADPH)和能量(ATP)促进了微藻对硝态氮的还原同化作用。

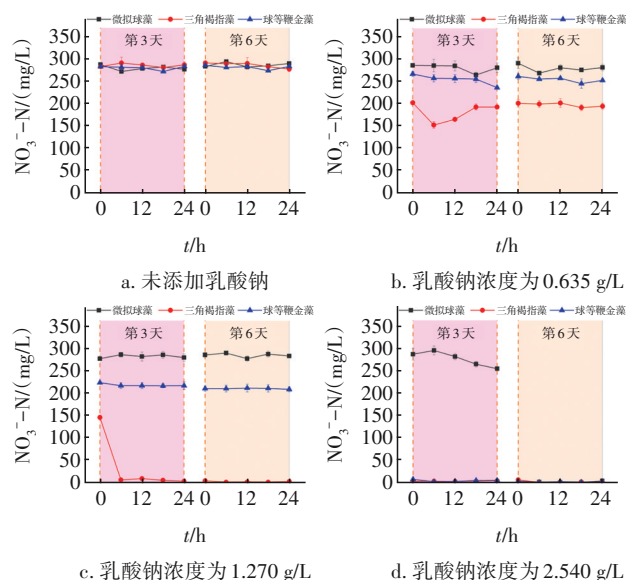


图 3 短周期内三种微藻对硝态氮的去除效果

Fig.3 Removal efficiency of nitrate nitrogen by three microalgae in a short period

2.2.2 对 PO₄³⁻-P 的去除效果

长周期内三种微藻对 PO₄³⁻-P 的去除效果见表 4。

表 4 长周期内三种微藻对 PO₄³⁻-P 的去除效果

Tab.4 Removal efficiency of PO₄³⁻-P by three microalgae in a long period

项 目	乳酸钠浓度/(g/L)	PO ₄ ³⁻ -P 浓度/(mg/L)				
		0 d	2 d	4 d	6 d	8 d
微拟球藻	0	52.46	44.00	41.61	46.20	46.11
	0.635	50.40	34.25	21.48	4.86	3.64
	1.270	51.22	44.04	26.18	10.43	2.11
	2.540	49.02	35.97	30.54	4.42	0.14
三角褐指藻	0	51.93	46.66	44.16	46.36	49.16
	0.635	49.43	22.93	4.79	1.35	0.14
	1.270	51.98	45.81	8.25	1.67	3.09
	2.540	50.30	21.28	2.77	0.00	0.00
球等鞭金藻	0	52.07	49.96	48.03	48.01	49.85
	0.635	52.87	18.25	11.92	10.41	11.92
	1.270	51.13	34.46	12.70	6.01	6.67
	2.540	52.64	38.36	5.25	2.08	0.94

从表 4 可知,未添加乳酸钠组的 PO₄³⁻-P 浓度在 40~50 mg/L 左右波动,这可能是由于微藻对磷的物理吸附和释放作用,同化作用并不明显。添加乳酸钠后,三种微藻对 PO₄³⁻-P 的去除能力显著增强。在乳酸钠浓度为 0.635 g/L 条件下,微拟球藻组对 PO₄³⁻-P 的去除率为 93%,三角褐指藻组的去除率为 99%,球等鞭金藻组的去除率为 77%,单位微藻去除

量分别为 39.29、43.21 和 42.22 mg/g。在 2.540 g/L 乳酸钠组中,三种微藻对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除率均达到 98% 以上,其中三角褐指藻的去除速度最快。有研究表明^[12],在氮与磷浓度不变时,适当提高废水中的 C/N 值会提升微藻去除 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的速度,这就解释了乳酸钠浓度为 2.540 g/L 时三种微藻去除率达到最高的原因。

短周期内三种微藻对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除效果如图 4 所示。在乳酸钠浓度为 0.635、1.270 g/L 条件下,微拟球藻和球等鞭金藻在第 3 天光照阶段可快速去除 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 。而在乳酸钠浓度为 2.540 g/L 条件下,微拟球藻变化不明显,球等鞭金藻可快速去除 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$,之后 12 h 去除基本停滞,表明光照更有利于 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除。已有研究表明,光照促进了多磷酸盐(ASP)的积累和后续蛋白质及 DNA 的转化^[13],这一过程为微藻提供了充足的磷源储备,支持其生长与代谢活动。

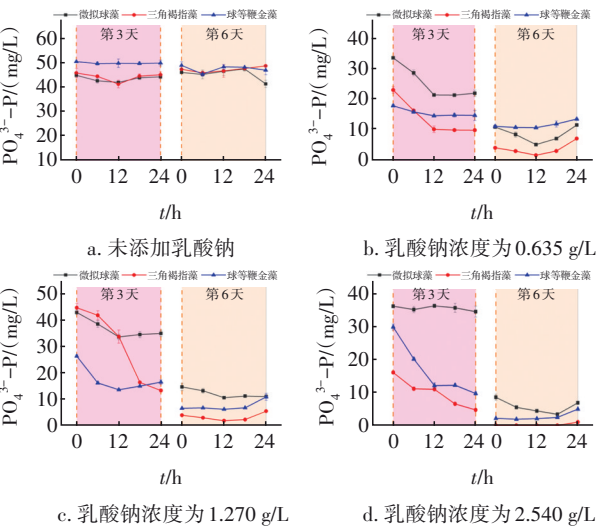


图 4 短周期内三种微藻对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除效果

Fig.4 Removal efficiency of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ by three microalgae in a short period

2.2.3 对乳酸钠的去除效果

在培养周期内,所有微藻均能完全去除乳酸钠,但去除效率存在差异。微拟球藻对乳酸钠的去除效率最低,当乳酸钠浓度为 1.270 和 2.540 g/L 时,需要 6 d 才能被完全去除;三角褐指藻和球等鞭金藻的去除效率几乎相同,均能在第 2 天去除不同浓度的乳酸钠。据报道^[12],许多微藻因缺乏有效的有机碳源运输途径而不适合处理废水。在本研究中,微拟球藻去除乳酸钠的速度明显慢于三角褐指藻

和球等鞭金藻,这可能是由于微拟球藻在乳酸钠代谢相关酶活性上存在差异。在微拟球藻的碳代谢过程中,磷酸葡萄糖变位酶和 UDP-葡萄糖-4-差向异构酶与糖酵解过程密切相关,在不同条件下变化显著^[14],其变化或许影响了乳酸钠的代谢效率。

2.3 三种耐盐微藻资源化产物产出情况

三种微藻在总脂肪酸含量及其脂肪酸组成方面存在显著差异。微拟球藻和三角褐指藻的总脂肪酸占藻细胞干质量的比例相近,分别为 37.31% 和 36.85%,远高于球等鞭金藻的 11.11%。在脂肪酸组成上,不饱和脂肪酸占比最高的是微拟球藻(54%),其次为三角褐指藻(48%),而球等鞭金藻的不饱和脂肪酸比例最低,仅为 23%。微拟球藻、三角褐指藻和球等鞭金藻的饱和度分别为 46%、52%、77%。饱和脂肪酸因其高饱和度,成为提升生物柴油品质的一个重要因素。高饱和度对生物柴油的质量具有积极影响,例如增加十六烷值和氧化稳定性^[15]。具体来说,适用于生物柴油生产的脂肪酸主要包括棕榈酸和油酸等。在本研究中,三角褐指藻的棕榈酸与油酸占总脂肪酸的比例之和为 44%,是三种微藻中最高的,这表明高盐食品废水中培养的三角褐指藻在产生物柴油品质方面更具潜力。表 5 为三种微藻去除单位污染物转化总脂肪酸的产率。可以看出,三角褐指藻去除硝态氮、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和乳酸钠转化为总脂肪酸的产率最高,分别为 2.01 mg/mg、11.65 mg/mg 和 228.78 mg/g。综合来看,三角褐指藻在利用高盐食品加工废水协同脂肪酸产出方面具有更大的潜力。

表 5 三种微藻去除单位污染物转化总脂肪酸的产率

Tab.5 Conversion yield of total fatty acids during per unit of pollutants removed by three microalgae

项目	氨氮去除量/(mg/mg)	硝态氮去除量/(mg/mg)	$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除量/(mg/mg)	乳酸钠转化量/(mg/g)
微拟球藻	6.98	1.92	11.22	22.59
三角褐指藻	6.61	2.01	11.65	228.78
球等鞭金藻	2.82	0.50	2.82	54.88

3 结论

本研究评估了微拟球藻、三角褐指藻和球等鞭金藻三种耐盐微藻在不同乳酸钠浓度高盐食品加工废水中的生长特性、对常规污染物的去除能力及脂肪酸产量。结果表明,三种微藻在高乳酸钠浓度条件下均表现出一定的适应性,其中三角褐指藻在

2.540 g/L乳酸钠浓度下生物量最高。三角褐指藻对氨氮、硝态氮、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和乳酸钠的去除率均优于其他两类藻种,在第2天便实现了79%的氨氮去除率和99%的硝态氮去除率,且最终实现对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和乳酸钠100%的去除率。在高盐食品加工废水的高渗透压环境下,三角褐指藻表现出优异的耐盐性。此外,该藻种协同产总脂肪酸效果最优,呈现出显著的资源化利用潜力。

参考文献:

- [1] WANG S K, WANG X, TIAN Y T, et al. Nutrient recovery from tofu whey wastewater for the economical production of docosahexaenoic acid by *Schizochytrium* sp. S31 [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 710: 136448.
- [2] 张森,李文涛,连军锋,等. 紫外/氯工艺去除煤化工高盐废水中有机物的研究[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(21): 82-88.
- ZHANG M, LI W T, LIAN J F, et al. UV/chlorination process for the removal of organics in high salinity wastewater from coal chemical industry [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37 (21) : 82-88 (in Chinese).
- [3] LEE S Y, LEE J S, SIM S J. Enhancement of microalgal biomass productivity through mixotrophic culture process utilizing waste soy sauce and industrial flue gas [J]. *Bioresource Technology*, 2023, 373: 128719.
- [4] WAN L, WU Y X, ZHANG X M, et al. Nutrient removal from pickle industry wastewater by cultivation of *Chlorella pyrenoidosa* for lipid production [J]. *Water Science and Technology*, 2019, 79 (11/12) : 2166-2174.
- [5] HU H, WU B L, WEI D, et al. Salinity controlling enhanced high-salinity pickle wastewater treatment coupling with high-value fatty acid production by *Dunaliella salina* [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 448: 141732.
- [6] LAUBE H, REZA M T. Application of biosorbents for ion removal from sodium lactate fermentation broth [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2016, 4(1): 10-19.
- [7] HU H, YU X C, HU Y Y, et al. Microalgal-bacterial biofilms enhance pollutant removal coupling with eicosapentaenoic acid production in high-concentration ammonia-nitrogen wastewater [J]. *Science of the Total Environment*, 2025, 958: 178121.
- [8] VO T K Q, HOANG Q H, NGO H H, et al. Influence of salinity on microalgae-bacteria symbiosis treating shrimp farming wastewater [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 902: 166111.
- [9] DONG J W, LI L Q, LIU Q Q, et al. Interactive effects of polymethyl methacrylate (PMMA) microplastics and salinity variation on a marine diatom *Phaeodactylum tricornutum* [J]. *Chemosphere*, 2022, 289: 133240.
- [10] LI Y Q, MENG X, WANG Z Y, et al. Utilization of tofu wastewater and *Nannochloropsis oceanica* for eutrophication mitigation and eicosapentaenoic acid valorization: advancing carbon neutrality and resource recycling [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 493: 152706.
- [11] TIAN X S, LIN X A, XIE Q, et al. Effects of temperature and light on microalgal growth and nutrient removal in turtle aquaculture wastewater [J]. 2024. DOI:10.3390/biology13110901.
- [12] SU Y Y. Revisiting carbon, nitrogen, and phosphorus metabolisms in microalgae for wastewater treatment [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 762: 144590.
- [13] TONG C, HU G S, JI B, et al. Light intensity-regulated glycogen synthesis and pollutant removal in microalgal-bacterial granular sludge for wastewater treatment [J]. *Water Research*, 2025, 271: 122988.
- [14] OUYANG L Y, WANG J, ZHU H, et al. Integration of epigenome and lactylome reveals the regulation of lipid production in *Nannochloropsis oceanica* [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2024, 72 (24) : 13785-13800.
- [15] LEONG W H, SAMAN N A M, KIATKITTIPONG W, et al. Photoperiod-induced mixotrophic metabolism in *Chlorella vulgaris* for high biomass and lipid to biodiesel productions using municipal wastewater medium [J]. *Fuel*, 2022, 313: 123052.

作者简介:胡昊(1981—),男,安徽淮南人,博士,副教授,主要研究方向为污水低碳处理与资源化利用。

E-mail:huhao2019@ustc.edu.cn

收稿日期:2025-03-25

修回日期:2025-05-11

(编辑:任莹莹)