

衣藻中试修复稀土氨氮废水

郭旭¹, 周有彩^{1,2}, 何勇锦^{1,3}, 陈必链^{1,3}, 王明兹^{1,3*}

1 福建师范大学 生命科学学院, 福建 福州 350117

2 福建技术师范学院 食品与生物工程学院, 福建 福清 350300

3 福建师范大学 工业微生物教育部工程研究中心, 福建 福州 350117

郭旭, 周有彩, 何勇锦, 陈必链, 王明兹. 衣藻中试修复稀土氨氮废水[J]. 生物工程学报, 2024, 40(10): 3781-3794.

GUO Xu, ZHOU Youcai, HE Yongjin, CHEN Bilian, WANG Mingzi. Pilot-scale bioremediation of rare earths wastewater by *Chlamydomonas* sp. YC[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2024, 40(10): 3781-3794.

摘要: 硫酸铵介导的南方离子型稀土浸取开采产生了大量含高氨氮尾水, 引发了严重的环境污染问题。本研究以从原始稀土氨氮尾水中分离到的衣藻(*Chlamydomonas* sp.) YC 为出发藻株, 选择 50 L 柱式光生物反应器(airlift photobioreactors, AL-PBRs)和 5 m³ 开放式跑道池光生物反应器(open race-way photobioreactors, ORWPs)两种中试反应器, 研究该藻户外处理稀土氨氮尾水(NH₄⁺-N, 约 2 000 mg/L)的生长情况和尾水处理性能; 此外, 检测采收的藻粉氨基酸、脂肪酸等生化组分, 评估其营养价值。结果表明, 与 ORWPs 相比, 衣藻 YC 在 AL-PBRs 中处理稀土氨氮尾水具有更高的生物量(1.1 g/L)、NH₄⁺-N (24.9%)与总氮去除率(20.4%)和 CO₂ 的固定速率[125.0 mg/(L·d)]。对于藻粉生化组分方面, AL-PBRs 和 ORWPs 获得的衣藻 YC 蛋白含量分别为 44.5%和 49.4%, 油脂含量分别为 9.1%和 14.3%。同时, 与大豆蛋白(0.657)相比, 两种藻粉的必需氨基酸指数(essential amino acid indexes, EAAI)更高(均为 0.900), 这表明衣藻藻粉具有更好的营养价值。本研究的结果表明, 衣藻 YC 中试柱式光生物反应器室外处理稀土氨氮尾水的工艺可能是一种潜在集成生物固碳、污水处理和藻粉开发的耦合技术。

关键词: 稀土高氨氮尾水; 衣藻 YC; 户外规模化处理; 营养价值评估

资助项目: 福建省科技重大专项(2023YZ037002); 福建省教育厅重点项目(2022G2013); 福建省环保科技计划(2023R001)
This work was supported by the Fujian Provincial Science and Technology Major Project (2023YZ037002), the Key Project of Fujian Provincial Department of Education (2022G2013), and the Fujian Provincial Environmental Protection Science and Technology Project (2023R001).

*Corresponding author. E-mail: mingziw@fjnu.edu.cn

Received: 2023-11-21; Accepted: 2024-01-13; Published online: 2024-01-19

Pilot-scale bioremediation of rare earths wastewater by *Chlamydomonas* sp. YC

GUO Xu¹, ZHOU Youcai^{1,2}, HE Yongjin^{1,3}, CHEN Bilian^{1,3}, WANG Mingzi^{1,3*}

1 College of Life Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, Fujian, China

2 School of Food and Biological Engineering, Fujian Polytechnic Normal University, Fuqing 350300, Fujian, China

3 Engineering Research Center of Industrial Microbiology, Ministry of Education, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, Fujian, China

Abstract: The extraction of rare earth elements (REEs) through *in-situ* leaching with ammonium sulphate $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$ had resulted in the production of a large volume of ammonium-rich wastewater, causing severe environmental pollution. This study aimed to assess the ability of an indigenous microalga *Chlamydomonas* sp. YC, isolated from REEs wastewater, to directly treat real REEs wastewater under outdoor conditions in 50 L airlift photobioreactors (AL-PBRs) and 5.0 m³ open race-way photobioreactors (ORWPs). Additionally, the harvested *Chlamydomonas* sp. YC biomasses from these two pilot photobioreactors were comprehensively analyzed to evaluate the nutritional values. The results showed that *Chlamydomonas* sp. YC in AL-PBRs exhibited higher biomass production (1.1 g/L), greater removal efficiencies in NH_4^+ -N (24.9%) and total nitrogen (20.4%), as well as higher CO_2 fixation rate (125.0 mg/(L·d)), compared to those of ORWPs. Moreover, the *Chlamydomonas* sp. YC biomasses obtained from the two pilot photobioreactors contained 44.5% and 49.4% protein, 9.1% and 14.3% lipids. Moreover, *Chlamydomonas* sp. YC in the two pilot photobioreactors displayed essential amino acid indexes (EAAI) of 0.900, which was higher than that of soybean protein (0.657), indicating superior nutritional values. In conclusion, the implementation of the process involving *Chlamydomonas* sp. YC in AL-PBRs under outdoor conditions holds promise as a coupled microalgal biotechnology for the simultaneous removal of NH_4^+ -N from REEs wastewater, and the capture of CO_2 for the production of valuable biomass.

Keywords: rare earths ammonium wastewater; *Chlamydomonas* sp. YC; outdoor pilot-scale; nutritional values evaluation

稀土元素是全球重要的战略性资源，在航空航天、激光、医疗和能源等高新行业发挥不可或缺的作用^[1]。一直以来，我国凭借丰富的稀土种类和庞大的储备量在全球稀土出口贸易中扮演着重要角色^[2]。其中，南方离子型稀土为我国稀有的矿产资源，当前的开采方式主要是硫酸铵 $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$ 介导的原地浸矿工艺，该工艺的最大优点是无须剥离表土和开挖山体，

对山体植被损害较小，也不会产生大量尾矿^[3]。但是，由于大量的 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 注入山体，闭矿后会产生高浓度氨氮尾水。经雨水淋滤和地表渗漏等作用，这些尾水会流向地下水或河流湖泊等淡水，进而引起水体富营养化，甚至危害人体健康^[4]。据统计，开采 1 t 稀土元素会产生约 2 万 t 不同氨氮浓度(10–5 000 mg/L)的稀土尾水^[5-6]。当前，稀土开采过程中产生的氨氮污

染问题已经成为制约稀土行业发展的瓶颈问题。

因稀土尾水缺少碳源,传统微生物硝化反硝化处理氨氮需要大量补充有机碳源,导致处理成本居高不下^[7-8]。光自养微藻能进行光合作用,以空气中 CO₂ 和稀土氨氮尾水的氮源为营养物质,将低值化物质转化为高附加值的微藻生物质,助力我国碳中和以及解决饲料蛋白与油脂资源短缺的目标的实现^[9]。然而,微藻应用于稀土氨氮尾水处理和 CO₂ 固定的研究大多还处于实验室水平,无法对规模化开采稀土产生的大量稀土尾水及时处理。此外,与室内处理尾水相比,微藻在户外条件下可直接利用太阳光为光源进行光合作用,可大大降低尾水处理成本。因此,亟须研发能高效处理稀土氨氮尾水的户外中试微藻生物技术,实现微藻固碳和稀土氨氮尾水的绿色低碳处理。

目前,研究者已设计开发气升式光生物反应器(airlift photobioreactors, AL-PBRs)和开放式跑道池光生物反应器(open race-way photobioreactors, ORWPs)、管式光生物反应器(tubular photobioreactors, TB-PBRs)等多种反应器,并应用于微藻培养和尾水处理^[10-11]。与 TB-PBRs 相比,AL-PBRs 和 ORWPs 具有造价低、操作简便、能耗低等优点,受到微藻科技者的关注^[12]。例如, Morillas-España 等^[13]利用栅藻(*Scenedesmus* sp.)对生活废水在夏季进行户外中试跑道池光生物反应器(11.8 m³)处理,该藻的最大氮去除速率为 4 286.6 mg/(m²·d)。Xue 等^[14]选择小球藻(*Chlorella sorokiniana*)处理厨余废水,微藻在柱式反应器的最终生物量为 2.8 g/L,对废水的 NH₄⁺-N、总氮(total nitrogen, TN)、总磷(total phosphorus, TP)和化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)去除率分别达到 97.9%、85.7%、98.0%和 86.4%。因此,本研究采用 AL-PBRs 和 ORWPs 两种中试规模的

光生物反应器,评估微藻户外处理稀土氨氮尾水的性能,为今后推广微藻处理稀土氨氮尾水提供依据。

2022年5月11日,莱茵衣藻(*Chlamydomonas reinhardtii*)被国家卫生健康委员会正式授权为新的食品原料,可用于开发食品和动物饲料。近期,本课题组率先从氨氮浓度约为 2 000 mg/L 的稀土尾水中分离到一株耐高氨氮衣藻(*Chlamydomonas* sp.) YC,并建立了实验室水平高效处理稀土氨氮尾水的小试工艺^[15]。为了实现低成本的规模化处理稀土氨氮尾水,本研究选择衣藻 YC 为出发藻株,利用 50 L 的柱式光生物反应器和 5 m³ 的跑道池进行户外中试处理原始稀土氨氮尾水,系统测定该藻的生长、稀土氨氮尾水处理效果和 CO₂ 固定的能力。与此同时,处理稀土氨氮尾水后,收集藻细胞,分析其主要营养成分,为高值化开发衣藻 YC 生物质资源用于饲料原料方面提供参考。

1 材料与方法

1.1 藻种和稀土尾水

衣藻 YC 分离自福建省长汀县赤钨稀土开发有限公司稀土矿区,保藏于本实验室^[15]。藻种保藏所用斜面培养基为含有 2.0%琼脂的 BG11 培养基。

实验所用稀土氨氮尾水取自福建省长汀赤钨稀土矿区。初始稀土氨氮尾水经自沉降去除较大不溶性固体颗粒后,其主要成分为: NH₄⁺-N, (2 052.0±54.0) mg/L; TN, (2 114.0±77.0) mg/L; pH 7.2±0.1; COD, (47.0±16.0) mg/L; Mg²⁺, (69.4±1.5) mg/L; Ca²⁺, (29.5±0.4) mg/L; K⁺, (17.8±0.1) mg/L; Na⁺, (35.2±0.8) mg/L; Hg、Pb、Cd、Cr 和 As 均低于 0.001 mg/L。尾水在使用前,添加 KH₂PO₄,使 TP 浓度达到 15mg/L^[15]。同时,在尾水中加入 5%次氯酸钠,处理 1 d。

最后,加入 10%硫代硫酸钠调节尾水 pH 至 7.5。

1.2 牡蛎壳

牡蛎壳(oyster shell piece, OSP)购自揭阳市普宁面对面食品有限公司,大小为 1-2 目。牡蛎壳成分为: CaCO_3 , 90.0%; 脂质, 0.1%; 蛋白质, 1.8%; P, 48.0 mg/kg; Mn, 81.0 mg/kg; Mg, 2.0 g/kg; Fe, 285.0 mg/kg; K, 214.0 mg/kg; Zn, 2.9 mg/kg。

1.3 实验仪器

UV-1800 紫外分光光度计, 岛津公司; LH-3BN 总氮测定仪, B-1 (V8)智能多参数水消解仪, 北京连华科技发展有限公司; LZB-3WB 气体流量计, 祥云自动化仪表有限公司; DELTA320 pH 计, 梅特勒托利多仪器上海有限公司; SCIENTZ-10N 冷冻干燥机, 宁波新芝生物科技股份有限公司; Scion 436 气相色谱仪, 天美仪拓实验室设备(上海)有限公司; BS224S 分析天平, 赛多利斯科学仪器(北京)有限公司。

1.4 方法

1.4.1 藻种制备

将衣藻 YC 接种于含有原始稀土尾水的 1.5 L AL-PBRs 中培养, 通气量为 0.7 L/min。随后,

将一级种子液扩培至 50 L 的 AL-PBRs 和 100 L 聚乙烯桶中, 通气量为 30 L/min。待藻种培养至对数生长期, 获得衣藻 YC 种子液。上述藻种制备过程的培养光照强度控制在 $100 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 温度为 25°C 。

1.4.2 户外规模化处理稀土尾水

将培养至对数期的衣藻 YC 种子液, 按 10% 的接种量接种至 50 L 柱式光生物反应器 (AL-PBRs) 和 5 m^3 开放式跑道池光生物反应器 (ORWPs) 中进行户外培养, 培养周期为 15 d。50 L AL-PBRs 和 5 m^3 ORWPs 的结构示意图如图 1 所示。50 L 的 AL-PBRs 由透明的甲基丙烯酸酯构成, 高度和内直径分别为 0.80 m 和 0.29 m, 底部连接通气装置, 实际培养液体为 40 L (图 1A)。ORWPs 的长度、宽度和高度分别为 8.2、1.4、0.5 m (总容积约为 5 m^3), 内部装有四叶式轮桨可对培养液进行搅拌, 跑道池通过水泵(功率 75.0 W)连接到一个曝气罐(底部面积 0.5 m^2 , 高度 100.0 cm), 体积约 500 L, 实验过程实际培养液体为 3 500 L (图 1B)。稀土尾水处理过程中, 使用约 1.0 g/L 的 OSP 调节培养基的 pH 值^[16]。两种反应器每天 7:00-17:00 进行持续通空气处理,

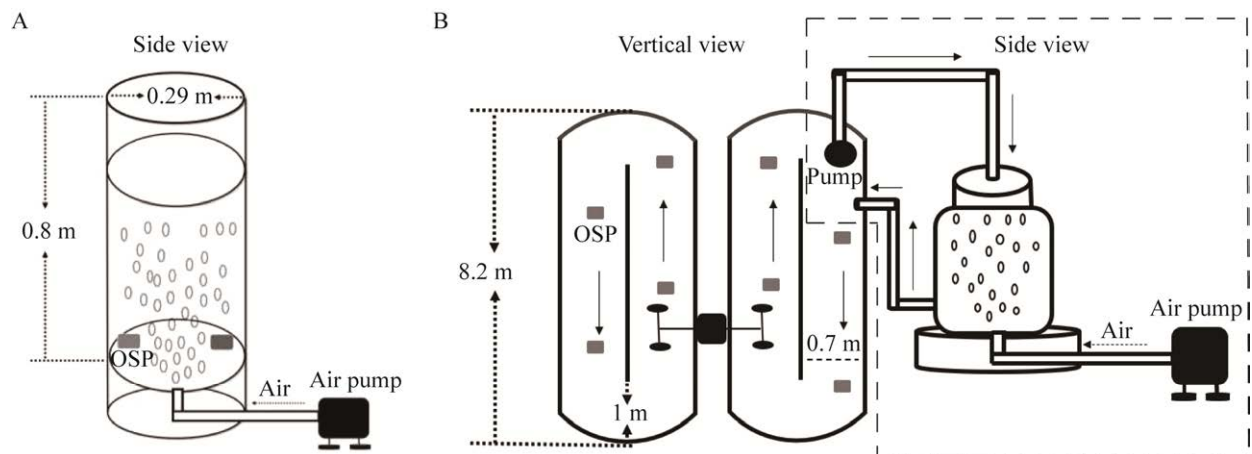


图 1 生物反应器结构示意图 A: 50 L AL-PBRs (侧视图). B: 5 m^3 ORWPs (俯视图)

Figure 1 Schematic diagram of structure of bioreactor. A: 50 L AL-PBRs in the side view. B: 5 m^3 ORWPs in the vertical view.

AL-PBRs 和 ORWPs 通气量分别控制在 30.0 L/min 和 2.0 m³/h。跑道池的四叶式轮桨连续运转 10 h (7:00–17:00)。每天定期取样测定衣藻 YC 的生物量以及尾水的 pH、NH₄⁺-N、TN 和 TP。处理结束后,采收藻细胞,用于分析蛋白质、碳水化合物、油脂、氨基酸组成和脂肪酸组成等指标。

1.5 计算方法

1.5.1 生物量及生长动力学相关参数测定

收集 10 mL 衣藻 YC 培养液, 8 000 r/min 离心 10 min, 藻体沉淀用双蒸水洗涤 3 次后, 采用细胞干重法测定生物量^[17]。衣藻 YC 比生长速率(μ , d⁻¹)可由公式(1)计算:

$$\mu = (\ln M_2 - \ln M_1) / (T_2 - T_1) \quad (1)$$

式中, M_2 和 M_1 分别是第 T_2 和 T_1 天的微藻生物量(g/L)。

微藻生物量产率[P, mg/(L·d)]可由公式(2)计算:

$$P = (M_2 - M_1) / (T_2 - T_1) \quad (2)$$

1.5.2 稀土尾水培养液各组分去除率计算

根据国家标准法测定上清液中的 NH₄⁺-N (HJ 535—2009)、TN (HJ 636—2012)和 TP (GB 11893—89)。利用公式(3)计算衣藻 YC 对稀土尾水 NH₄⁺-N 和 TN 的去除效率(RE, %):

$$RE = (C_0 - C_n) / C_0 \times 100\% \quad (3)$$

式中, C_0 和 C_n 分别是第 0 天和第 n 天稀土尾水污染物的浓度(mg/L)。

1.5.3 衣藻 YC 固定 CO₂ 量的计算

基于 Chisti^[18]的研究, 微藻细胞的分子式可表示为 CO_{0.48}H_{1.83}N_{0.11}P_{0.01}, 即含碳量约为 51.4%。因此 CO₂ 固定量(FCO₂, g/L)可通过以下公式(4)计算^[19]:

$$FCO_2 = C_c (X_s - X_i) \cdot (M_{CO_2} / M_c) \quad (4)$$

式中, C_c 为微藻细胞中的碳含量(g/g), X_s 为培养后的藻体生物量(g/L), X_i 为初始生物量(g/L), M_{CO_2} 为 CO₂ 的分子量(44.0 g/mol), M_c

为碳原子的相对分子质量(12.0 g/mol)。

1.5.4 衣藻 YC 生物大分子含量测定

利用双蒸水洗涤收集的藻体 3 次, 于冷冻干燥机中进行干燥。藻粉蛋白含量采用凯氏定氮法测定^[20]; 氨基酸各组分含量采用酸水解法测定(GB 5009.124—2016); 碳水化合物含量采用苯酚硫酸法测定^[21]; 油脂含量采用氯仿-甲醇法测定; 脂肪酸组成分析采用气相色谱法测定^[22]。

1.5.5 衣藻 YC 氮吸收含量计算

通常, 蛋白质的氮含量平均为 16%。因此, 衣藻 YC 氮吸收的含量(A_N , g/L)可由公式(5)进行计算:

$$A_N = (P_t - P_0) \times 0.16 \quad (5)$$

式中, A_N 为微藻细胞吸收的氮含量, P_t 和 P_0 为微藻细胞在 t 时刻和初始时刻的胞内蛋白质浓度(g/L)。

1.5.6 衣藻 YC 氨基酸组分分析及营养价值评估

衣藻 YC 蛋白质营养价值通过公式(6)对必需氨基酸指数(essential amino acid indexes, EAAI)进行评价, 并与联合国粮农组织/世界卫生组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations/World Health Organization, FAO/WHO)提出的参比蛋白的必需氨基酸标准相对比^[23]。

$$EAAI = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n \frac{P_i}{P_i^*}} \quad (6)$$

式中, n 为必需氨基酸数, p_i 为待评价样品某必需氨基酸占必需氨基酸总量的比例(%), P_i^* 为参比蛋白中该必需氨基酸占必需氨基酸总量的比例(%)。

1.6 数据分析

本研究工作中, 中试柱式光生物反应器重复 3 批次, 跑道池反应器重复 2 批次。所得数据由 Microsoft Excel 2019 和 Origin 8.5 软件分析作图, 结果显示为算术平均值 \pm 标准偏差($\bar{x} \pm s$)。

2 结果与分析

2.1 衣藻 YC 在两种中试反应器中户外处理稀土尾水的生长情况

图 2 显示了两种户外光生物反应器处理稀土尾水过程中衣藻 YC 的生物量积累和稀土尾水的 pH 变化。由图 2A 可知, 在稀土尾水处理前期阶段(0-7 d), 衣藻 YC 在两种中试光生物器中的生物量无显著差异; 但在培养的第 8-14 天, AL-PBRs 组的衣藻细胞逐渐表现出更快的生长速率, 最终生物量为 1.1 g/L, 显著高于 ORWPs 组的值(0.8 g/L)。Zheng 等^[19]利用普通小球藻 (*Chlorella vulgaris*) MBFJNU-1 在室外 40 L 规模的柱式反应器中处理养猪废水, 获得的最高微藻生物量为 0.8 g/L。Chisti^[18]在室外 60 L

ORWPs 中用小球藻(*Parachlorella* sp.) JD076 处理城市尾水, 小球藻最高生物量约 0.5 g/L。在本研究中, AL-PBRs 和 ORWPs 获得的衣藻 YC 生物量(0.8-1.1 g/L)高于 Chisti^[18]和 Zheng 等^[19]的研究结果。这可能是因为微藻生物量的高低受到藻种来源、污水组成、户外条件等因素的影响^[24-25]。

稀土氨氮尾水是一种富含 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 的水体。 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 作为一种生理酸性盐, 在稀土尾水处理过程中, 微藻不断吸收利用其中的氮元素, 导致尾水培养液中 $c(\text{H}^+) > c(\text{OH}^-)$, 使 pH 持续降低, 若不及时调节 pH 会影响微藻生长^[26]。牡蛎壳是一种难溶于水但能与酸反应的高碳酸钙含量物质。课题组前期用牡蛎壳资源调节异养微藻处理稀土尾水产生的 pH 下降, 使微藻

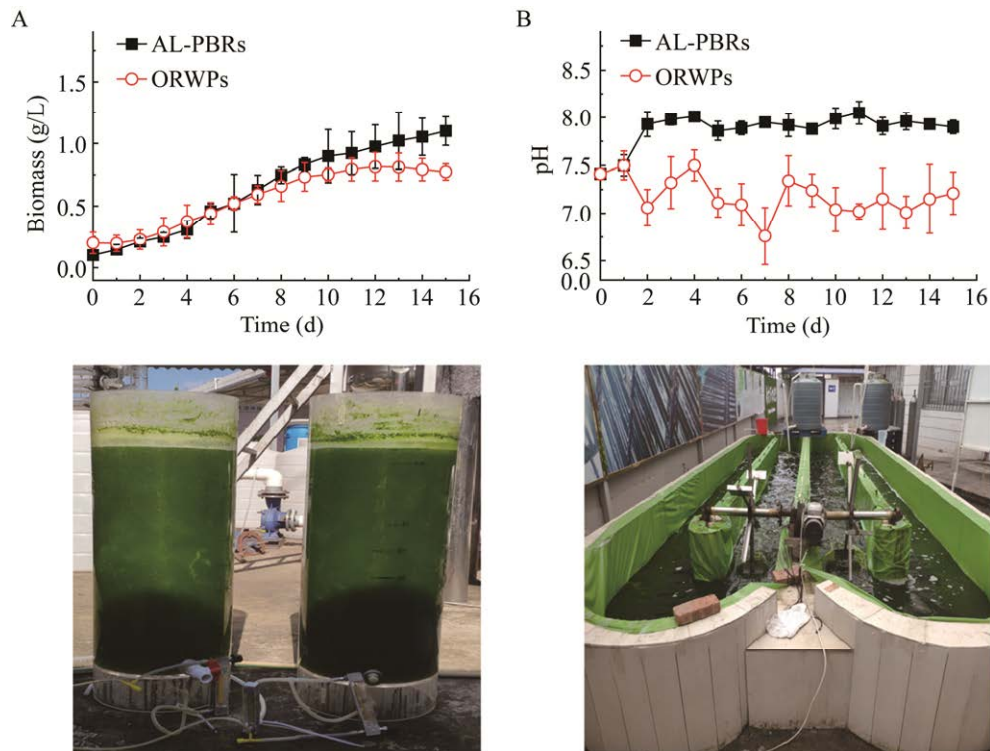


图 2 衣藻 YC 在 AL-PBRs 和 ORWPs 中户外直接处理稀土氨氮尾水过程中的生物量(A)和 pH (B)的变化

Figure 2 Variations of microalgal biomass (A) of *Chlamydomonas* sp. YC and pH (B) of the treated rare earth elements waste water in AL-PBRs and ORWPs under outdoor conditions.

生长处于相对稳定的 pH 范围内。本实验利用衣藻 YC 处理稀土氨氮尾水时也发现, 添加牡蛎壳会促使处理稀土尾水的 pH 处于相对稳定的状态(图 2B)。值得注意的是, ORWPs 组处理的稀土氨氮尾水 pH 稳定在 6.8–7.5, 明显低于 AL-PBRs 组的 pH 值。可能的原因是, 与 ORWPs 反应器相比, AL-PBRs 的通气位置分布在反应器的底部(图 1), 通气时产生的气泡会使沉底的牡蛎壳小颗粒悬浮并均匀分散在气升式反应器中, 更有效地实时调节变化的 pH, 促进微藻生物量积累(图 2A)。

2.2 衣藻 YC 在两种反应器中户外直接处理稀土氨氮尾水营养物的去除情况

氮元素是微藻生长的重要营养元素, 供给

细胞合成核酸、蛋白质等维持生长所必需的组分。稀土尾水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 可被微藻吸收转化为优质蛋白质或其他含氮代谢产物, 实现稀土氨氮尾水绿色净化^[27]。图 3A 和 3B 为衣藻 YC 在户外两种反应器中处理稀土尾水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 的情况。由图 3A 和 3B 可知, 经过 15 d 的处理后, 衣藻 YC 在中试两种反应器中都具有有效地去除原始稀土尾水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 的能力。其中, 衣藻 YC 在 AL-PBRs 和 ORWPs 的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率分别为 24.9%和 16.7%, TN 去除率分别为 20.4%和 16.2%。衣藻 YC 在 AL-PBRs 反应器中处理稀土尾水对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 的去除率高于在 ORWPs 中获得的值, 这可能的原因是 AL-PBRs 为衣藻 YC 细胞处理稀土尾水提供更稳定的条

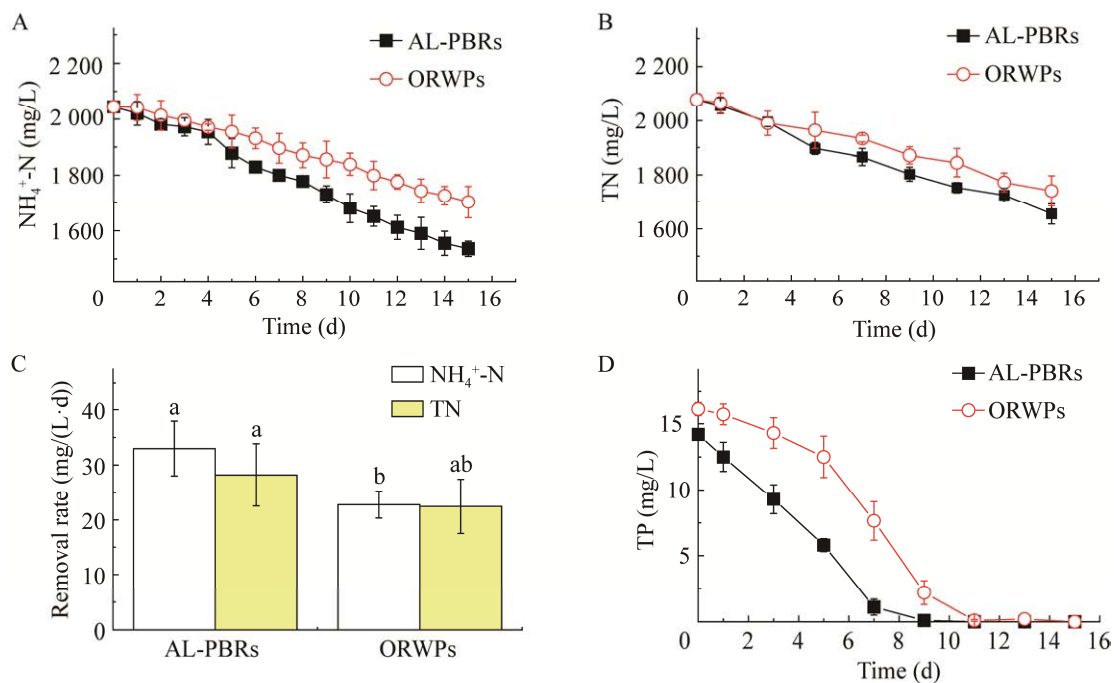


图3 衣藻 YC 利用 AL-PBRs 和 ORWPs 户外处理稀土尾水过程中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度(A)、TN 浓度(B)、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 TN 去除率(C)和 TP 浓度(D)的变化情况 “a”和“b”代表 AL-PBRs 和 ORWPs 之间的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 去除率的差异

Figure 3 Changes in the concentrations of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (A) and TN (B), the removal rates of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TN (C), and TP concentration (D) of rare earth elements wastewater by *Chlamydomonas* sp. YC in AL-PBRs and ORWPs under outdoor conditions. “a” and “b” represent the differences in $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TN removal rates between AL-PBRs and ORWPs.

件,提高了藻细胞内谷氨酰胺合成酶(glutamine synthetase, GS)和谷氨酸合成酶(glutamine oxoglutarate aminotransferase, GOGAT)参与的GS-GOGAT等氮代谢的水平,进而吸收更多的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 用于合成生物量(图2A)^[28]。

针对图3A和3B的结果,将衣藻细胞对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TN去除率进行换算。由图3C可知,衣藻在AL-PBRs中对稀土尾水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TN的去除速率分别为33.0 mg/(L·d)和28.2 mg/(L·d),明显高于ORWPs组的结果[$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除速率为22.8 mg/(L·d),TN去除速率为22.5 mg/(L·d)]。Zhang等^[7]用微藻(栅藻属和副小球藻属)处理初始 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度为125.0 mg/L的稀土尾水,其氮去除速率为12.6 mg/(L·d)。与Zhang等^[7]用的栅藻属和副小球藻属相比,衣藻YC可能是一株可高效去除稀土尾水氨氮和/或总氮的潜在藻种。

磷元素也是微藻生长的必需元素。本研究处理的稀土氨氮尾水不含磷元素。基于此,本研究添加了15 mg/L TP于处理的尾水中,并检测衣藻YC吸收TP的情况。由图3D可知,经15 d的稀土氨氮尾水处理后,衣藻YC细胞在两种反应器中都能完全吸收所添加的TP,不会对处理稀土尾水产生二次污染。为了能更高效处理稀土氨氮尾水,今后将尝试在户外利用衣藻YC规模化处理稀土尾水过程中添加适量的TP浓度,促进微藻的生长并提高 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效率。

2.3 衣藻YC处理稀土尾水过程中氮质量平衡分析

一般来说,稀土尾水中的氮可以通过被微藻细胞吸收和吸附、游离氨挥发以及形成其他类型的沉淀等方式去除^[29]。为了进一步阐明衣藻YC在AL-PBRs和ORWPs两种反应器中的脱氮机理,对稀土尾水的氮质量平衡进行了分

析。由表1可知,经15 d的处理后,衣藻YC在AL-PBRs和ORWPs中对原始稀土尾水总 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除浓度分别为509.0 mg/L和302.0 mg/L。微藻吸收稀土尾水氨氮并用于合成蛋白质的氮含量分别为102.0 mg/L和59.0 mg/L。由此可见,在两种光生物反应器中,衣藻YC细胞吸收的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 合成微藻蛋白质的转化率约为20%(表1)。有研究表明,微藻的细胞表面的一些活性官能团(如羧基和羟基)对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 有吸附作用^[30]。在本研究中,相比较于ORWPs,衣藻YC在AL-PBRs反应器中积累了更多的生物量(图2A),可能有利于藻细胞表面对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸附作用。另一方面,在碱性条件下,富含氨氮的稀土尾水中有游离氨(NH_3)和离子铵(NH_4^+)两种形式存在。通常,体系pH值过高会促使污水形成游离氨,游离氨被吹脱或挥发至大气中^[31]。在本研究中,由于反应器结构的不同,衣藻YC在AL-PBRs中处理稀土尾水的pH值显著高于ORWPs(图2B),促进AL-PBRs中的 NH_3 经通气而挥发到空气中。因此,综合 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸收和游离氨的形成两种作用,衣藻YC利用AL-PBRs对稀土尾水氨氮的处理效果高于ORWPs。

2.4 衣藻YC的 CO_2 固定能力分析

表2展示了衣藻YC在两种反应器中处理原始稀土尾水的生长动力学参数值和 CO_2 固定速率。由表2可知,衣藻YC在AL-PBRs中的

表1 衣藻YC在处理稀土尾水过程中的氮平衡计算

Table 1 Analysis of nitrogen removal and fate in the process of REEs wastewater by *Chlamydomonas* sp. YC

Nitrogen	AL-PBRs (mg/L)	ORWPs (mg/L)
Initial $\text{NH}_4^+\text{-N}$	2 045.0	2 045.0
Final $\text{NH}_4^+\text{-N}$	1 536.0±27.1	1 703.0±57.0
$\text{NH}_4^+\text{-N}$ removal	509.0±28.3	342.0±80.6
Microalgal absorption nitrogen	102.3±11.2	58.8±4.9

表 2 衣藻 YC 在两种光生物反应器中的 CO₂ 固定参数

Table 2 CO₂ fixation parameters of *Chlamydomonas* sp. YC in two pilot-photobioreactors

Kinetic parameters	AL-PBRs	ORWPs
Total biomass productivity (mg/(L·d))	64.000±2.700	57.000±3.200
Maximum specific growth rate (μ_{max} , d ⁻¹)	0.400±0.024	0.300±0.014
CO ₂ fixation rate (mg/(L·d))	125.000±16.100	66.700±7.800

比生长速率、总生物量生产速率和 CO₂ 固定速率分别为 0.4 d⁻¹、64.0 mg/(L·d)和 125.0 mg/(L·d)，显著高于在 ORWPs 所获得的值，主要原因为衣藻 YC 在 AL-PBRs 有更好的生长性能(图 2A)。本研究的结果表明，AL-PBRs 可能是衣藻 YC 直接处理原始稀土氨氮尾水和固碳的潜在反应器。

2.5 衣藻 YC 户外处理稀土氨氮尾水收获生物质分析

为评估利用稀土尾水培养衣藻 YC 所得生物质的应用潜能，培养结束后，收集藻细胞，并测定其蛋白质、油脂以及碳水化合物含量。由图 4 可知，衣藻 YC 在两种反应器中处理稀土尾水后，细胞中的大分子含量从高到低依次为：蛋白质(44.5%–49.4%)>碳水化合物(27.0%–27.7%)>油脂(9.1%–14.3%)。其中，衣藻 YC 在 AL-PBRs 中的蛋白质积累较高于 ORWPs，而油脂含量较低，说明藻细胞在两种反应器中的蛋白质合成、油脂合成等代谢活力存在显著差异。有研究表明，微藻生物质内的蛋白质和油脂可为饲养动物生长与发育提供所需的必需氨基酸和脂肪酸^[32]。因此，本研究对利用衣藻 YC 在户外规模化处理稀土尾水所获得的微藻生物质进行了氨基酸和脂肪酸组分分析，进一步评估获得衣藻藻粉的营养价值。

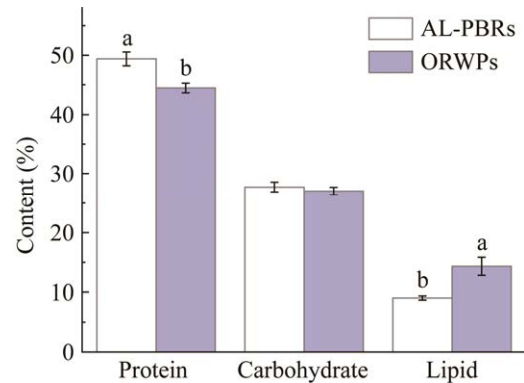


图 4 AL-PBRs 和 ORWPs 户外条件下处理稀土尾水的衣藻 YC 生物大分子成分差异 不同小写字母代表数据统计学上的差异

Figure 4 The differences in biochemical composition of *Chlamydomonas* sp. YC derived from REEs wastewater in AL-PBRs and ORWPs. Different lowercase letters represent statistically different significance.

2.6 衣藻 YC 藻粉的蛋白质评价

蛋白质中的氨基酸组成是评估饲料来源营养水平的重要参考。表 3 为衣藻 YC 利用两种反应器户外处理稀土尾水后获得的藻粉中的氨基酸组分分析。由表 3 可知，在 AL-PBRs 和 ORWPs 中的衣藻藻粉中氨基酸占总蛋白含量较高的有谷氨酸(11.4%–12.7%)、天冬氨酸(9.5%–10.5%)、亮氨酸(9.5%–10.1%)和丙氨酸(8.2%–9.6%)。值得注意的是，在两种反应器中培养的衣服 YC 蛋白质组分中含量最高的氨基酸均为谷氨酸。其可能的原因是 NH₄⁺是微藻细胞氨基酸合成过程中重要的前体物质，可在谷氨酸脱氢酶的催化下与 α -酮戊二酸结合生成谷氨酸^[33]。Darwish 等^[34]对莱茵衣藻(*Chlamydomonas reinhardtii*)、小球藻(*Chlorella* sp.)和螺旋藻(*Spirulina* sp.)的氨基酸组分进行分析比较，各藻细胞中含量最高的氨基酸均为谷氨酸(120.0–137.0 mg/L)。此外，赵叶等^[35]的研究表明，在饲料中添加谷氨酸可以改善草鱼生长过程的肌纤维结构和肌肉结构

表 3 两种反应器的衣藻 YC 藻粉蛋白氨基酸组分及必需氨基酸产量

Table 3 Amino acid composition (amino acid/protein, mg/g) and essential amino acids productivity of *Chlamydomonas* sp. YC in AL-PBRs and ORWPs

Amino acid	AL-PBRs	ORWPs	FAO/WHO standard	Soya
Met	9.3±1.4	11.1±2.4	22	7
Lys	59.9±2.7	68.1±2.2	45	34
Ile	45.3±1.6	43.7±3.8	30	21
Leu	100.8±3.2	95.0±5.4	59	35
Phe+Tyr	91.4±3.6	96.1±3.7	38	24
Thr	48.9±2.1	56.0±2.9	23	19
Val	64.7±4.4	65.6±3.8	39	24
His	21.8±1.9	17.0±2.5	15	12
Glu	127.1±4.9	114.1±6.2	-	-
Asp	97.5±6.6	105.2±4.9	-	-
Ser	44.5±2.9	51.7±2.4	-	-
Gly	66.3±3.1	67.2±3.3	-	-
Ala	95.5±2.4	82.0±5.2	-	-
Arg	66.8±4.5	68.1±3.7	-	-
Pro	47.3±1.3	48.3±3.1	-	-
Cys-Cys	10.9±2.4	10.2±1.8	-	-
EAA	442.1±29.6	452.6±37.8	-	-
NEAA	555.9±39.7	546.8±43.3	-	-
EAAI	0.9	0.9	-	0.7
Essential amino acid productivity (mg/(L·d))	16.0±2.5	10.7±1.5		

“-” represents no data available for this item. EAA: Essential amino acid; NEAA: Nonessential amino acid; EAAI: Essential amino acid indexes.

的特性。因此富含谷氨酸的衣藻 YC 具有开发为鱼饲料蛋白的潜能。

另外,蛋白质中必需氨基酸种类及其比例是该蛋白质营养品质的重要参考。由表 3 可知,衣藻 YC 在 AL-PBRs 和 ORWPs 两种反应器处理稀土尾水获得的藻粉蛋白中的必需氨基酸(essential amino acids, EAA)含量、必需氨基酸/总氨基酸(essential amino acids/total amino acids, EAA/TAA)和必需氨基酸/非必需氨基酸(essential amino

acids/non-essential amino acids, EAA/NEAA)值并无明显差异。但就必需氨基酸产量来看,衣藻 YC 在 AL-PBRs 中的必需氨基酸产量[16.0 mg/(L·d)]要明显高于 ORWPs 组[10.7 mg/(L·d)],可能是因为衣藻 YC 在 AL-PBRs 有更高的生物量(图 2A)和蛋白质含量(图 4)。这些结果表明,衣藻 YC 细胞在不同反应器中对稀土氨氮尾水营养物质吸收存在明显差异(图 3),并影响衣藻生物物质积累,造成必需氨基酸产量的不同。同时,表 3 中可以看出在 AL-PBRs 和 ORWPs 中获得的衣藻 YC 蛋白中 EAA/TAA (44.3%–45.3%)和 EAA/NEAA (79.5%–82.8%)均高于 FAO/WHO 建议的理想蛋白质氨基酸组成的值(EAA/TAA 为 40%–60%, EAA/NEAA>60%)。此外,衣藻 YC 利用 AL-PBRs 和 ORWPs 两种反应器处理稀土尾水后的蛋白质在 FAO/WHO 模式下的 EAAI 均为 0.9,远高于大豆蛋白(0.657)。这些结果说明户外利用衣藻 YC 处理稀土尾水后获得的蛋白营养价值高,具有开发为优质动物饲料的巨大潜能。

2.7 衣藻 YC 藻粉脂肪酸组分分析

对衣藻 YC 油脂的脂肪酸组成进行测定,由表 4 可知,衣藻 YC 合成的脂肪酸类型是棕

表 4 两种反应器衣藻 YC 藻粉的主要脂肪酸含量和必需脂肪酸产量

Table 4 Fatty acids composition and essential fatty acids productivity of *Chlamydomonas* sp. YC in AL-PBRs and ORWPs

Fatty acids	AL-PBRs (%)	ORWPs (%)
C _{16:0}	28.0±1.5	32.2±1.6
C _{18:0}	10.2±1.2	8.8±0.7
C _{20:0}	15.3±1.7	7.6±0.8
C _{18:1}	8.1±0.8	13.4±0.5
C _{18:2}	11.8±0.5	14.1±1.4
C _{18:3n-3}	8.4±1.2	12.1±1.2
Essential fatty acids productivity (mg/(L·d))	24.0±2.1	30.0±2.6

桐酸(C_{16:0})、硬脂酸(C_{18:0})、花生酸(C_{20:0})、油酸(C_{18:1})、亚油酸(C_{18:2})和亚麻酸(C_{18:3n-3})。此外,由表4的结果还可以看出,两种反应器处理稀土氨氮尾水可能影响衣藻YC细胞内脂肪酸脱氢酶和延长酶等酶的活力,进而调节脂肪酸合成代谢水平,使藻细胞内的各脂肪酸类型存在明显差异^[36]。

亚油酸和亚麻酸作为重要的必需脂肪酸,可提高养殖动物的饲料摄食率和生长性能,增强动物机体免疫力,提高动物生产肉蛋奶等产品的营养价值^[37]。由表4可知,衣藻YC藻粉中含有较高含量的亚油酸(11.8%–14.1%)和亚麻酸(8.4%–12.1%)。因此,衣藻YC可能是一种潜在合成必需脂肪酸的藻株,该藻固碳所得藻粉可为养殖动物提供可持续、可再生的必需脂肪酸资源。综上,在利用稀土污水户外条件培养的衣藻YC富含C₁₆–C₂₀脂肪酸,具有成为优质饲料组分或饲料源的潜力。

2.8 衣藻YC开发饲料的重金属安全性评价

上述结果表明,衣藻YC的氨基酸和脂肪酸组成使其具有成为优质饲料的巨大潜力,进一步测定了衣藻YC中的重金属含量,并将其与饲料卫生标准(GB 13078—2017)进行比较(表5)。由表5可知,利用稀土污水户外培养的衣藻YC藻粉中汞(Hg)、铅(Pb)、镉(Cd)、铬(Cr)

和砷(As)含量极低,符合饲料卫生标准所规定的值。为更加全面评估由稀土尾水培养的衣藻YC开发为动物饲料的安全性,后期工作将致力于对衣藻YC藻粉进行毒性测试等研究。此外,已有研究表明,部分微藻细胞可以选择性吸附稀土离子^[30]。基于此,今后的研究工作还可以尝试使用衣藻YC对稀土尾水的稀土离子进行富集,并开发相应绿色、节能的方法将稀土离子与微藻生物质进行分离浮选,同时获得高值稀土离子产品和开发安全性微藻饲料。

3 讨论与结论

本研究率先利用衣藻YC在AL-PBRs和ORWPs两种中试反应器中进行户外中试规模直接处理稀土高氨氮尾水。研究结果表明,衣藻YC在AL-PBRs中净化稀土氨氮尾水可获得更高的生物量、氨氮去除率和固碳率。此外,两种中试反应器处理稀土尾水的衣藻藻粉的蛋白质和油脂含量存在明显差异,衣藻YC蛋白的EAA、EAA/TAA、EAA/NEAA和EAAI均符合FAO/WHO所建议的理想氨基酸成分指标要求;衣藻YC油脂含11.8%–14.1%的亚油酸和8.4%–12.1%的亚麻酸。此外,两种中试反应器处理稀土尾水的衣藻YC获得的必需氨基酸含量和必需脂肪酸产量无差异,但AL-PBRs的必需氨基酸产量[16.0 mg/(L·d)]要优于ORWPs[10.7 mg/(L·d)]。基于上述所得结果,由衣藻YC介导的中试AL-PBRs直接处理原始稀土尾水是一种集成微藻生物固碳、净化污水和饲料开发的潜在耦合工艺,能够实现低值化的CO₂和氨氮向高值化饲料的生物转化,助力我国“碳中和”和解决饲料蛋白原料短缺的目标。

REFERENCES

[1] OPARE EO, STRUHS E, MIRKOEI A. A

表5 衣藻YC藻粉重金属含量检测

Table 5 Heavy metal detection of *Chlamydomonas* sp. YC dry biomass

Heavy metal	Method	AL-PBRs (mg/kg)	ORWPs (mg/kg)	Hygienical standard for feeds
Hg	GB/T 13081	0.010±0.004	0.060±0.020	≤0.1
Pb	GB/T 13080	0.140±0.020	1.820±0.200	≤5
Cd	GB/T 13082	0.060±0.010	0.010±0.003	≤2
Cr	GB/T 13088—2006	0.310±0.090	3.010±0.800	≤5
As	GB/T 13079	0.110±0.020	0.260±0.080	≤40

- comparative state-of-technology review and future directions for rare earth element separation[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 143: 110917.
- [2] HUANG XW, LONG ZQ, WANG LS, FENG ZY. Technology development for rare earth cleaner hydrometallurgy in China[J]. *Rare Metals*, 2015, 34(4): 215-222.
- [3] 郑先坤, 冯秀娟, 陈哲, 朱易春. 离子型稀土原地浸矿废弃地中残存稀土分布规律及配分特征[J]. *稀土*, 2020, 41(3): 60-67.
- ZHENG XK, FENG XJ, CHEN Z, ZHU YC. Study on distribution law and distribution characteristics of residual rare earth in ion-type rare earth *in-situ* leaching wasteland[J]. *Chinese Rare Earths*, 2020, 41(3): 60-67 (in Chinese).
- [4] 郭钟群, 赵奎, 金解放, 王观石, 朱易春. 离子型稀土矿环境风险评估及污染治理研究进展[J]. *稀土*, 2019, 40(3): 115-126.
- GUO ZQ, ZHAO K, JIN JF, WANG GS, ZHU YC. Reviews on environmental assessment and pollution prevention of ion adsorption type rare earth ores[J]. *Chinese Rare Earths*, 2019, 40(3): 115-126 (in Chinese).
- [5] MANCHERI NA, SPRECHER B, BAILEY G, GE JP, TUKKER A. Effect of Chinese policies on rare earth supply chain resilience[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 142: 101-112.
- [6] YIN SH, CHEN KH, SRINIVASAKANNAN C, GUO SH, LI SW, PENG JH, ZHANG LB. Enhancing recovery of ammonia from rare earth wastewater by air stripping combination of microwave heating and high gravity technology[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 337: 515-521.
- [7] ZHANG YK, XIONG ZS, YANG LM, REN Z, SHAO PH, SHI H, XIAO X, PAVLOSTATHIS SG, FANG LL, LUO XB. Successful isolation of a tolerant co-flocculating microalgae towards highly efficient nitrogen removal in harsh rare earth element tailings (REEs) wastewater[J]. *Water Research*, 2019, 166: 115076.
- [8] 牛晓倩, 周胜虎, 邓禹. 脱氮微生物及脱氮工艺研究进展[J]. *生物工程学报*, 2021, 37(10): 3505-3519.
- NIU XQ, ZHOU SH, DENG Y. Advances in denitrification microorganisms and processes[J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2021, 37(10): 3505-3519 (in Chinese).
- [9] 杨晓秋, 吴寅嵩, 闫金定, 宋海刚, 范建华, 李元广. 基于文献计量学的微藻生物技术发展趋势[J]. *生物工程学报*, 2015, 31(10): 1415-1436.
- YANG XQ, WU YS, YAN JD, SONG HG, FAN JH, LI YG. Trends of microalgal biotechnology: a view from bibliometrics[J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2015, 31(10): 1415-1436 (in Chinese).
- [10] ZHANG Q, YU ZG, ZHU LD, YE T, ZUO JL, LI XM, XIAO B, JIN SP. Vertical-algal-biofilm enhanced raceway pond for cost-effective wastewater treatment and value-added products production[J]. *Water Research*, 2018, 139: 144-157.
- [11] MICHELS MHA, VASKOSKA M, VERMUE MH, WIJFFELS RH. Growth of *Tetraselmis suecica* in a tubular photobioreactor on wastewater from a fish farm[J]. *Water Research*, 2014, 65: 290-296.
- [12] RAEISSADATI M, VADIVELLOO A, BAHRI PA, PARLEVLIE D, MOHEIMANI NR. Treating anaerobically digested piggery effluent (ADPE) using microalgae in thin layer reactor and raceway pond[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2019, 31(4): 2311-2319.
- [13] MORILLAS-ESPAÑA A, LAFARGA T, SÁNCHEZ-ZURANO A, ACIÉN-FERNÁNDEZ FG, RODRÍGUEZ-MIRANDA E, GÓMEZ-SERRANO C, GONZÁLEZ-LÓPEZ CV. Year-long evaluation of microalgae production in wastewater using pilot-scale raceway photobioreactors: assessment of biomass productivity and nutrient recovery capacity[J]. *Algal Research*, 2021, 60: 102500.
- [14] XUE CY, GAO K, QIAN PK, DONG JW, GAO Z, LIU QQ, CHEN B, DENG XY. Cultivation of *Chlorella sorokiniana* in a bubble-column bioreactor coupled with cooking cocoon wastewater treatment: effects of initial cell density and aeration rate[J]. *Water Science and Technology: a Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 2021, 83(11): 2615-2628.
- [15] ZHOU YC, HE YJ, ZHOU ZH, XIAO XH, WANG MZ, CHEN BL. A newly isolated microalga

- Chlamydomonas* sp. YC to efficiently remove ammonium nitrogen of rare earth elements wastewater[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 316: 115284.
- [16] ZHOU YC, HE YJ, XIAO XX, LIANG ZB, DAI JX, WANG MZ, CHEN BL. A novel and efficient strategy mediated with calcium carbonate-rich sources to remove ammonium sulfate from rare earth wastewater by heterotrophic *Chlorella* species[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 343: 125994.
- [17] AUSSANT J, GUIHÉNEUF F, STENGEL DB. Impact of temperature on fatty acid composition and nutritional value in eight species of microalgae[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2018, 102(12): 5279-5297.
- [18] CHISTI Y. Biodiesel from microalgae[J]. *Biotechnology Advances*, 2007, 25(3): 294-306.
- [19] ZHENG MM, DAI JX, JI XW, LI DG, HE YJ, WANG MZ, HUANG J, CHEN BL. An integrated semi-continuous culture to treat original swine wastewater and fix carbon dioxide by an indigenous *Chlorella vulgaris* MBFJNU-1 in an outdoor photobioreactor[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 340: 125703.
- [20] ARAYA M, GARCIA S, RENGEI J, PIZARRO S. Determination of free and protein amino acid content in microalgae by HPLC-DAD with pre-column derivatization and pressure hydrolysis[J]. *Marine Chemistry*, 2021(3): 103999.
- [21] ZHANG WH, WU J, WENG LY, ZHANG HJ, ZHANG J, WU AB. An improved phenol-sulfuric acid method for the determination of carbohydrates in the presence of persulfate[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 227: 115332.
- [22] CHEN G-Q, JIANG Y, CHEN F. Fatty acid and lipid class composition of the eicosapentaenoic acid-producing microalga, *Nitzschia laevis*[J]. *Food Chemistry*, 2007, 104(4): 1580-1585.
- [23] KÖHLER R, KARIUKI L, LAMBERT C, BIESALSKI HK. Protein, amino acid and mineral composition of some edible insects from Thailand[J]. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 2019, 22(1): 372-378.
- [24] MANTOVANI M, MARAZZI F, FORNAROLI R, BELLUCCI M, FICARA E, MEZZANOTTE V. Outdoor pilot-scale raceway as a microalgae-bacteria sidestream treatment in a WWTP[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 710: 135583.
- [25] ZHU LD, WANG ZM, TAKALA J, HILTUNEN E, QIN L, XU ZB, QIN XX, YUAN ZH. Scale-up potential of cultivating *Chlorella zofingiensis* in piggery wastewater for biodiesel production[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 137: 318-325.
- [26] LIU YQ, LIU ZC, CUI D, YANG LM, WANG HY, PAVLOSTATHIS S, GENG YN, XIONG ZS, SHAO PH, LUO XB, LUO SL. Buffered loofah supported microalgae-bacteria symbiotic (MBS) system for enhanced nitrogen removal from rare earth element tailings (REEs) wastewater: performance and functional gene analysis[J]. *Chemosphere*, 2023, 323: 138265.
- [27] SALBITANI G, CARFAGNA S. Ammonium utilization in microalgae: a sustainable method for wastewater treatment[J]. *Sustainability*, 2021, 13(2): 956.
- [28] CHHANDAMA MVL, SATYAN KB, CHANGMAI B, VANLALVENI C, LALTHAZUALA ROKHUM S. Microalgae as a feedstock for the production of biodiesel: a review[J]. *Bioresource Technology Reports*, 2021, 15: 100771.
- [29] CAI T, PARK SY, LI YB. Nutrient recovery from wastewater streams by microalgae: status and prospects[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 19: 360-369.
- [30] SUN YB, LU T, PAN YL, SHI MH, DING D, MA ZW, LIU JY, YUAN YP, FEI L, SUN YQ. Recovering rare earth elements *via* immobilized red algae from ammonium-rich wastewater[J]. *Environmental Science and Ecotechnology*, 2022, 12: 100204.
- [31] GONZALEZ-SALGADO I, GUIGUI C, SPERANDIO M. Transmembrane chemical absorption technology for ammonia recovery from wastewater: a critical review[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 444: 136491.
- [32] VIEGAS C, GOUVEIA L, GONCALVES M. Aquaculture wastewater treatment through microalgal. Biomass potential applications on animal feed, agriculture, and energy[J]. *Journal of Environmental*

Management, 2021, 286: 112187.

- [33] AHMED SF, MOFIJUR M, PARISA TA, ISLAM N, KUSUMO F, INAYAT A, LE VG, BADRUDDIN IA, YUNUS KHAN TM, ONG HC. Progress and challenges of contaminate removal from wastewater using microalgae biomass[J]. Chemosphere, 2022, 286(Pt 1): 131656.
- [34] DARWISH R, GEDI MA, AKEPACH P, ASSAYE H, ZAKY AS, GRAY DA. *Chlamydomonas reinhardtii* is a potential food supplement with the capacity to outperform *Chlorella* and *Spirulina*[J]. Applied Sciences, 2020, 10(19): 6736.
- [35] 赵叶, 周小秋, 胡肄, 李家勇, 李欠, 冯琳, 姜维丹, 刘扬, 姜俊. 饲料中添加谷氨酸对生长中期草鱼肌肉品质的影响[J]. 动物营养学报, 2014, 26(11): 3452-3460.
- ZHAO Y, ZHOU XQ, HU Y, LI JY, LI Q, FENG L, JIANG WD, LIU Y, JIANG J. Effects of dietary glutamate on muscle quality of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) during middle growth period[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2014, 26(11): 3452-3460 (in Chinese).
- [36] MARTÍNEZ-MACIAS MR, AGUILAR-RUIZ RJ, NATERAS-RAMÍREZ O, SÁNCHEZ-MACHADO DI, LÓPEZ-CERVANTES J, DÉVORA-ISIORDIA GE, ÁLVAREZ-SÁNCHEZ J, RÍOS-VÁZQUEZ NJ. Influence of different reactor types on *Nannochloropsis oculata* microalgae culture for lipids and fatty acid production[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2021, 98(10): 993-1000.
- [37] KHOLIF AE, GOUDA GA, OLAFADEHAN OA, ABDO MM. Effects of replacement of *Moringa oleifera* for berseem clover in the diets of Nubian goats on feed utilisation, and milk yield, composition and fatty acid profile[J]. Animal, 2018, 12(5): 964-972.

(本文责编 陈宏宇)