

光照周期对藻菌颗粒污泥系统处理含NMP废水的效能影响研究

尤秀雯, 李仁润邦, 张慧超, 安众一, 李丹*

烟台大学土木工程学院, 山东 烟台

收稿日期: 2026年3月24日; 录用日期: 2026年4月16日; 发布日期: 2026年4月29日

摘要

为应对传统处理方法处理含N-甲基-2-吡咯烷酮(NMP)的废水的局限性, 本研究利用藻菌颗粒污泥系统(ABGS), 以1000 mg/L NMP为处理对象, 通过序批式和半连续流实验, 系统探究全光照(24 h/0h)与光暗交替(12 h/12h)两种光照周期对ABGS处理NMP废水效能的影响。结果表明, 光暗交替条件表现出更好的脱氮性能, 大幅提升了TN去除率, 有效降低了氨氮积累。同时光暗交替显著提升原核生物群落多样性与结构稳定性, Bacteroidota、Acidobacteriota等脱氮和难降解有机物降解功能菌丰度上升, 真核生物则更适应全光照环境。本研究证实12 h/12h光暗交替有助于提升ABGS的脱氮效能, 为高浓度NMP工业废水的绿色低碳处理提供了实验依据。

关键词

藻-菌颗粒污泥(ABGS), N-甲基-2-吡咯烷酮, 光暗周期, 生物降解

Research on the Effect of Photoperiod on the Treatment Efficiency of NMP-Containing Wastewater by Algal-Bacterial Granular Sludge System

Xiuwen You, Renrunbang Li, Huichao Zhang, Zhongyi An, Dan Li*

School of Civil Engineering, Yantai University, Yantai Shandong

Received: March 24, 2026; accepted: April 16, 2026; published: April 29, 2026

*通讯作者。

文章引用: 尤秀雯, 李仁润邦, 张慧超, 安众一, 李丹. 光照周期对藻菌颗粒污泥系统处理含 NMP 废水的效能影响研究[J]. 水污染及处理, 2026, 14(2): 125-136. DOI: 10.12677/wpt.2026.142014

Abstract

To address the limitations of traditional methods in treating wastewater containing N-methyl-2-pyrrolidone (NMP), this study employed an algal-bacterial granular sludge (ABGS) system to treat 1000 mg/L NMP. Through batch and semi-continuous flow experiments, the effects of two photoperiods—continuous light (24 h/0h) and light-dark alternation (12 h/12h)—on the treatment efficiency of NMP-containing wastewater by the ABGS system were systematically investigated. The results showed that the light-dark alternation condition exhibited superior nitrogen removal performance, significantly enhancing the total nitrogen (TN) removal efficiency and effectively reducing ammonia nitrogen accumulation. Simultaneously, light-dark alternation markedly improved the diversity and structural stability of the prokaryotic community, with increased abundance of functional bacteria involved in nitrogen removal and degradation of refractory organic compounds, such as Bacteroidota and Acidobacteriota. In contrast, eukaryotic organisms were better adapted to the continuous light environment. This study confirms that a 12 h/12h light-dark alternation helps enhance the nitrogen removal performance of ABGS, providing experimental evidence for the green and low-carbon treatment of high-concentration NMP industrial wastewater.

Keywords

Algal-Bacterial Granular Sludge (ABGS), N-Methyl-2-Pyrrolidone, Light-Dark Cycle, Biodegradation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

N-甲基-2-吡咯烷酮(NMP)是在工业上应用极为广泛的含氮杂环有机化合物,涉及石油化工、锂离子电池、医药与农药等诸多行业。NMP是一种具有明确健康危害的化学品,美国国家环境保护局将其列入候选物污染名单 CCL [1],欧洲化学品管理局也将其列入高度关注物名单,最大限量值为 1000 mg/kg [2]。在 NMP 的实际应用过程中,不同行业所产生的废水往往具有复杂的组分特征,传统处理方法在应对其高效处理需求方面存在一定局限性,如成本较高,易产生二次污染等[3]。因此,当前研究广泛聚焦于基于藻菌共生体系的生物降解,探索其在复杂废水处理中的潜在优势与应用前景。

在藻菌共生系统中,藻类通过光合作用释放氧气,供好氧细菌降解有机物;细菌则代谢产生 CO₂ 和营养物质,促进藻类生长,形成良性的物质循环[4]。藻菌颗粒污泥系统(ABGS)是一项新兴的生态工程创新,利用微藻与细菌之间的协同效应,实现自给自足单元的高效废水处理[5]。相较于传统活性污泥工艺及好氧颗粒污泥技术,藻菌颗粒污泥在污染物处理效果、运行能耗管控、系统长期稳定性以及资源化回收利用等方面均表现出更为显著优势[6]。ABGS 不仅表现出更好的 COD、氮和磷去除效果,而且其 CO₂ 排放量显著低于 AGS 系统[7]。同时,颗粒结构改善了处理系统的沉降性能,不仅解决了传统微藻处理中藻体难以收集的问题,还在净化水质的同时实现资源回收[8]。有研究显示,藻类-细菌 AGS 对 Cr(VI)生物吸收 6 小时后,在 pH 2 时 Cr(VI)降低率最高达 99.3%,总 Cr 去除率在 pH 6 时达 89.1% [9]。除此之外,藻菌颗粒污泥在 1 mg/L 混合抗生素下可实现 73.2%和 64.0%的 ENR 和 SMX 去除率[10]。上述研究表明,藻菌颗粒污泥具有较强的处理难降解污染物的能力,这为其应用于 NMP 废水的生物处理提供了

现实依据。此前,关于利用 ABGS 系统处理含有 NMP 的废水研究中, NMP 浓度仅为 200 mg/L 左右[11][12],而实际生产废水中的 NMP 远超该浓度,以锂电池生产废水为例,不同生产环节的废水中, NMP 浓度为 1000~5000 mg/L。

微藻是 ABGS 的主要成分,受光照作用明显, ABGS 的形成、发育以及系统的稳定性和污染物去除性能都与光照密切相关[13]。光照周期影响藻菌颗粒污泥的物理特征及其对污染物的去除效果[14]。有研究表明,藻类的最高平均生长率和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除效率均在 12 小时光照/12 小时暗周期内达到[15]。

因此,本研究针对 1000 mg/L NMP 的浓度条件,系统考察了不同光照周期(全光照 24 h/0h 与光暗交替 12 h/12h)对藻菌颗粒污泥处理 NMP 废水效能的影响,进行了序批式实验和半连续流实验,分别用来探究藻菌颗粒污泥处理含 NMP 废水的可行性和验证反应系统能否稳定运行。实验中测定了光生物反应器出水中 COD、TOC、TN 和氨氮的浓度和去除效率。同时,通过分析藻菌颗粒污泥微生物的类型,研究了污染物去除的机制。研究结果为藻菌共生技术在废水处理领域中的应用提供了补充。

2. 材料与方法

2.1. 合成废水与反应器操作

实验采用合成废水作为进水,以 NMP 为唯一碳源和氮源。进水组分为 NMP (1000 mg/L)、NaCl (1000 mg/L)、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (500 mg/L)、 $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (500 mg/L)、 KH_2PO_4 (1000 mg/L)、微量元素溶液(2 mL/L),其中微量元素是根据前人的研究成果制备的[16]。

藻菌颗粒污泥为小球藻与活性污泥共培养驯化获得,小球藻来自水生生物研究所淡水藻类培养库,活性污泥从烟台市污水处理厂的曝气池中获得。成熟藻菌颗粒污泥混合液悬浮固体(MLSS)浓度为 5.1 g/L,污泥体积指数(SVI₅) 66.4 mL/g。利用驯化后的 ABGS,在光生物反应器内进行了光照周期为 24 h (Light, L)/0h (Dark, D)和 12 h/12h 的序批式实验和半连续流实验。序批式实验的 HRT 为 4 天;根据序批式实验的反应周期时长将半连续实验的 HRT 设定为 2 天,每天将反应器中一半的废水更换为新鲜配制的废水。

2.2. 分析方法

在分析之前,所有水样在采样后立即通过 0.22 μm 滤膜进行过滤。采用纳氏试剂分光光度法测定氨氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$),TN 采用碱性过硫酸钾消解法测量,化学需氧量(COD)浓度采用重铬酸钾消解(Thermo-Oriolid 165)法测定(HJ 828-2017)。使用总有机碳分析仪(Shimadzu TOC-L)测定总有机碳(TOC)。

2.3. EPS 的提取与分析

本研究采用修正后的热提取法实现 EPS 萃取[17]。分别使用 Bradford 和苯酚-硫酸法分析 EPS 中的蛋白质(PN)和多糖(PS)含量。

2.4. 高通量测序

使用 Illumina 高通量测序表征藻菌颗粒污泥的微生物群落变化,分别采集全光照周期和光暗交替周期的污泥样本。提取基因组 DNA,然后通过 1%琼脂糖凝胶电泳进行分析。根据指定的测序区域合成带有条形码的特异性引物。以 16S rRNA 和 18S rRNA 基因为靶标进行 PCR 扩增,根据扩增区域的特征构建小片段文库。利用 Illumina NovaSeq 平台进行双端测序,获取高质量的原始序列数据。将有效序列按照 97%的相似度阈值聚类为操作分类单元(OTUs),并基于 OTUs 的代表序列进行物种分类注释。

3. 结果与讨论

3.1. 序批式实验

3.1.1. 光照周期为 24 h/0h 的序批式实验

图 1(a)和图 1(b)为序批实验中光照周期为 24 h/0h 的 TN 和氨氮的浓度变化。经过 96 h, R1 和 R2 的 TN 浓度从初始的 138.8 ± 3.3 mg/L 分别降至 69.9 ± 2.7 mg/L 和 70.3 ± 4.1 mg/L, 去除率为 $49.7 \pm 2.1\%$ 和 $49.3 \pm 3.6\%$ 。体系中氨氮完全来源于 NMP 的生物降解。反应 30 min 后, R1 和 R2 中即可检测到氨氮, 48 h 达到峰值, 分别为 74.3 ± 1.8 mg/L 和 76.8 ± 1.5 mg/L; 此后略有下降, 96 h 后分别降至 68.7 ± 2.3 mg/L 和 68.7 ± 2.8 mg/L。图 1(c)和图 1(d)为 COD 和 TOC 的去除效果。反应 24 h 后, R1 和 R2 的 COD 浓度从 2016.5 ± 23.2 mg/L 快速降至 82.5 ± 4.6 mg/L 和 78.6 ± 24.9 mg/L, 去除率达 $95.9\% \pm 0.3\%$ 和 $96.1\% \pm 1.3\%$; 96 h 后进一步降至 36.8 ± 18.1 mg/L 和 56.1 ± 18.8 mg/L, 去除率上升至 $98.2\% \pm 0.9\%$ 和 $97.2\% \pm 0.9\%$ 。TOC 浓度分别从 628.2 ± 54.0 mg/L 降至 23.1 ± 7.6 mg/L 和 20.5 ± 9.3 mg/L, 去除率达 $96.4\% \pm 0.9\%$ 和 $96.8\% \pm 1.2\%$ 。

由此可以看出, 藻菌颗粒污泥具有良好的有机物去除性能和一定的脱氮能力。氨氮出现先升后略微下降的趋势, 表明 NMP 降解释放的氨氮速率快于藻类的同化吸收速率。同时, NMP 的 COD/N 的值约为 14.5, 其降解释放的氮量相对其碳源较为充足, 当藻类同化能力有限时, 氨氮易在系统中累积。

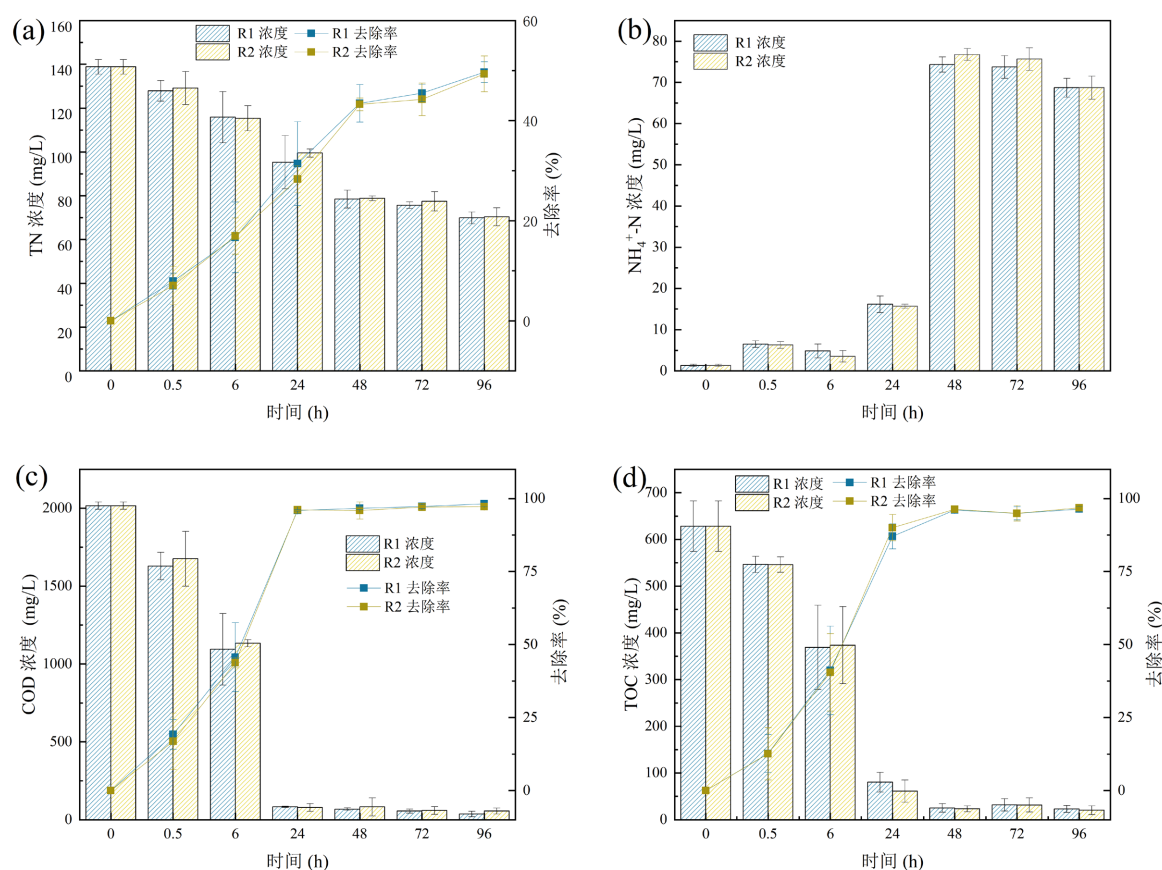


Figure 1. Changes in TN concentration and removal rate (a), NH₄⁺-N concentration (b), COD concentration and removal rate (c), and TOC concentration and removal rate (d) during the SBR sequencing batch experiment under a light period of 24 h/0h

图 1. 光照周期为 24 h/0h 时, SBR 序批式实验中 TN 浓度变化和去除率(a)、NH₄⁺-N 浓度变化和去除率(b)、COD 浓度变化和去除率(c)、TOC 浓度变化和去除率(d)

3.1.2. 光照周期为 12 h/12h 的序批式实验

图 2 为序批实验中光照周期为 12 h/12h 时反应体系中各指标变化情况。TN 初始浓度为 143.9 ± 4.1 mg/L, 12 h 后, R1 和 R2 的 TN 浓度降至 104.1 ± 3.4 mg/L 和 89.1 ± 4.6 mg/L, 去除率为 $27.6\% \pm 4.2\%$ 和 $38.0\% \pm 4.7\%$ 。继续反应至 24 h 时, TN 浓度分别为 73.0 ± 11.5 mg/L 和 61.9 ± 6.9 mg/L, 去除率为 $49.1\% \pm 9.4\%$ 和 $56.9\% \pm 6.0\%$ 。与全光照周期相比, 去效率有较大提升。随后, 在反应周期内 TN 浓度继续下降, 96 h 后, 去除率达到 $53.4\% \pm 10.1\%$ 和 $71.3\% \pm 6.0\%$ 。同样, 反应开始 30 min 后氨氮浓度有所上升, 12 h 内氨氮浓度基本没有变化。36 h 后氨氮浓度达到最高, 分别为 57.9 ± 0.8 mg/L 和 53.6 ± 2.5 mg/L。随后, 氨氮浓度逐渐下降, 96 h 后, R1 和 R2 的氨氮浓度降至 25.6 ± 2.1 mg/L 和 37.4 ± 7.1 mg/L。COD 与 TOC 的浓度同样在 24 h 内迅速下降。COD 初始浓度为 1887.3 ± 38.6 mg/L, 反应进行 24 h 后, R1 和 R2 的浓度分别降至 116.9 ± 41.0 mg/L 和 98.8 ± 17.7 mg/L, 去除率为 $93.8\% \pm 2.1\%$ 和 $94.8\% \pm 0.9\%$; TOC 的初始浓度为 716.7 ± 29.9 mg/L, 24 h 后, TOC 浓度分别下降至 84.2 ± 12.3 mg/L 和 73.3 ± 18.8 mg/L, 去除率为 88.3 ± 1.6 和 89.8 ± 2.4 。随后 TOC 浓度继续降低并逐渐趋于平稳, 反应周期结束后, R1 和 R2 的 TOC 浓度分别为 42.5 ± 10.1 mg/L 和 21.1 ± 2.5 mg/L, 去除率为 $94.1\% \pm 1.4\%$ 和 $97.1\% \pm 0.2\%$ 。

两种光照条件下 ABGS 对有机物均表现出高效的去除能力, 但在脱氮性能方面, 光暗交替条件展现出显著优势。与全光照条件相比, 光暗交替条件下, 既实现 TN 去除效率的显著提升, 又有效降低氨氮积累峰值, 促进其后续充分降解, 缓解了全光照下的氨氮积累的情况。

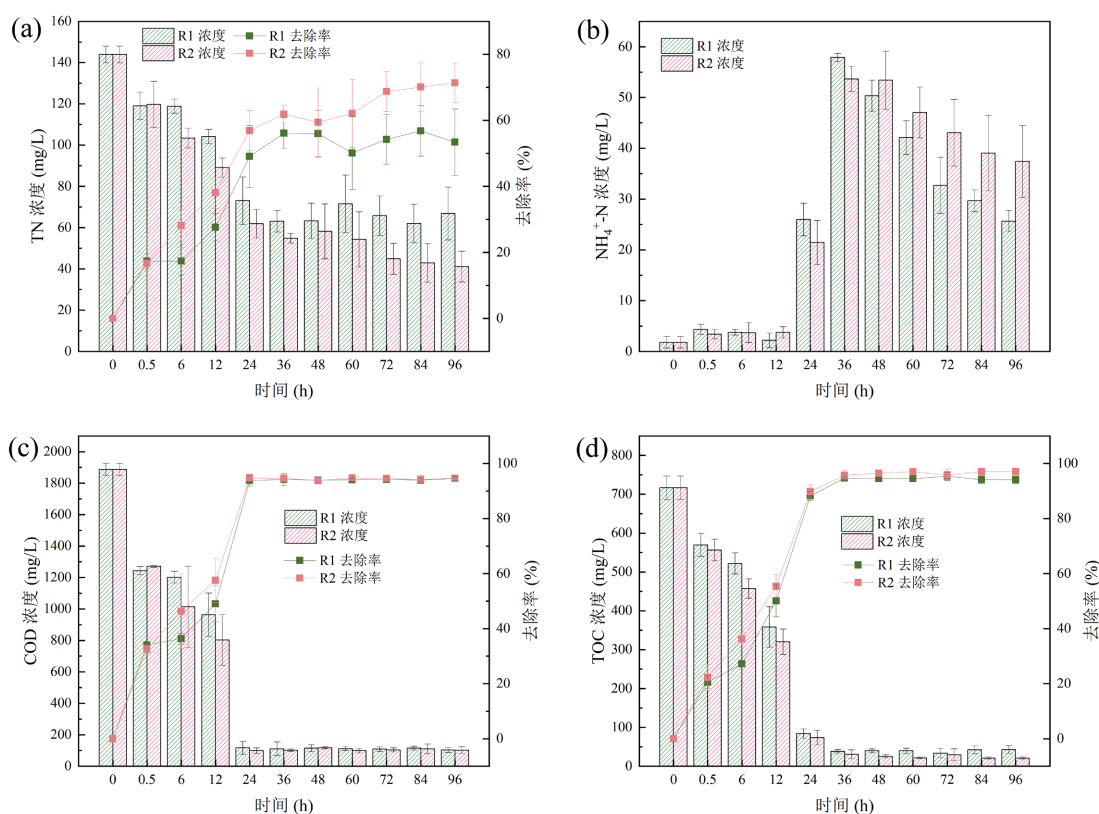


Figure 2. Changes in TN concentration and removal rate (a), NH₄⁺-N concentration (b), COD concentration and removal rate (c), and TOC concentration and removal rate (d) during the SBR sequencing batch experiment under a light period of 12 h/12h

图 2. 光照周期为 12h/12h 时, SBR 序批式实验中 TN 浓度变化和去除率(a)、NH₄⁺-N 浓度变化和去除率(c)、TOC 浓度变化和去除率(d)

3.2. 半连续流实验

3.2.1. 光照周期为 24 h/0h 的半连续流实验

光照周期为 24 h/0h 的半连续流实验结果如图 3 所示。混合废水初始 TN 浓度为 167.1 mg/L，处理一天后，R1 和 R2 的 TN 浓度分别降至 72.9 mg/L 和 78.5 mg/L，去除率为 56.4% 和 53.0%。第 2 天，R1 和 R2 的 TN 浓度分别从 116.3 mg/L 和 112.4 mg/L 降至 77.9 mg/L 和 80.2 mg/L，去除率分别为 33.0% 和 28.6%。随后出水 TN 存在一定波动，浓度维持在 70~85 mg/L 左右，去除率在 25%~40% 之间。R1 和 R2 的出水氨氮浓度在 60~80 mg/L 之间。COD 初始浓度为 1952.5 mg/L，一天内 R1、R2 中 COD 的浓度迅速下降至 16.3 mg/L 和 7.2 mg/L，去除率分别为 99.2% 和 99.6%。在第 2 天，R1 的 COD 浓度从 942.6 mg/L 降至 20.9 mg/L，去除率为 97.8%；R2 的 COD 浓度从 947.2 mg/L 降至 7.2 mg/L，去除率为 99.2%。此后，出水 COD 浓度始终保持在较低浓度。TOC 的去除了与 COD 类似，去除率保持在 92% 以上。

实验运行期间，系统对 COD 与 TOC 的去除效果保持稳定，COD 去除率最高可达 99% 以上，出水 COD 浓度满足我国《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级 A 标准(COD < 50 mg/L)，表明 ABGS 在长期运行中具备良好的有机物去除稳定性。相较于序批式实验，ABGS 对 TN 的去除效率有所降低，可能是每天换水导致的负荷波动降低了微生物群落的稳定性，从而抑制藻类对氨氮的同化吸收，影响整体脱氮活性[18]。在半连续流实验中，氨氮出水浓度维持在 60~80 mg/L 的较高水平，进一步印证了连续进水模式下藻类氨氮同化能力受限的问题。

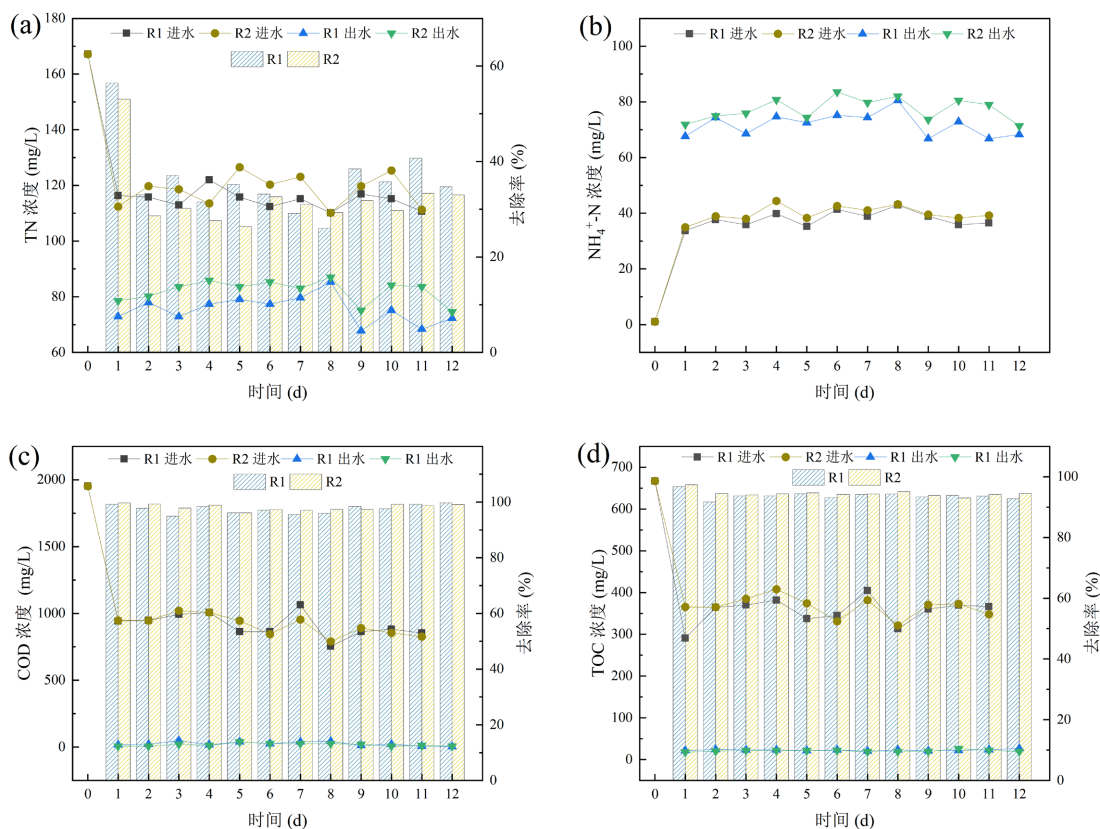


Figure 3. Changes in TN concentration and removal rate (a), NH₄⁺-N concentration (b), COD concentration and removal rate (c), and TOC concentration and removal rate (d) during the SBR semi-continuous flow experiment under a light period of 24 h/0h
图 3. 光照周期为 24 h/0h 时，SBR 半连续流实验中 TN 浓度变化和去除率(a)、NH₄⁺-N 浓度变化(b)、COD 浓度变化和去除率(c)、TOC 浓度变化和去除率(d)

3.2.2. 光照周期为 12 h/12h 的半连续流实验

光照周期为 12 h/12h 的半连续流实验结果如图 4 所示。TN 初始浓度为 177.7 mg/L，12 h 后 R1 和 R2 分别降至 75.0 mg/L 和 80.6 mg/L，去除率为 57.8% 和 54.6%；24 h 后去除率略有下降，后续趋于稳定，第 8 天出水浓度分别为 55.3 mg/L 和 54.1 mg/L，去除率为 41.7% 和 45.6%。NMP 在第一天快速降解产生氨氮，R1 和 R2 的浓度分别为 56.5 mg/L 和 62.2 mg/L，随后氨氮浓度维持在 35~50 mg/L 之间。COD 初始浓度为 1855.9 mg/L，12 h 内 R1 和 R2 迅速降至 83.3 mg/L 和 123.3 mg/L，去除率达 95.6% 和 93.4%；24 h 内进一步去除，运行期间整体去除率保持在 80% 以上。TOC 初始浓度为 675.4 mg/L，12 h 内，R1 和 R2 的 TOC 浓度下降至 101.9 mg/L 和 157.4 mg/L，去除率为 84.9% 和 76.7%，随着反应的进行，ABGS 对 TOC 的去除率继续上升，运行期间 R1 和 R2 的去除率均在 90% 左右。

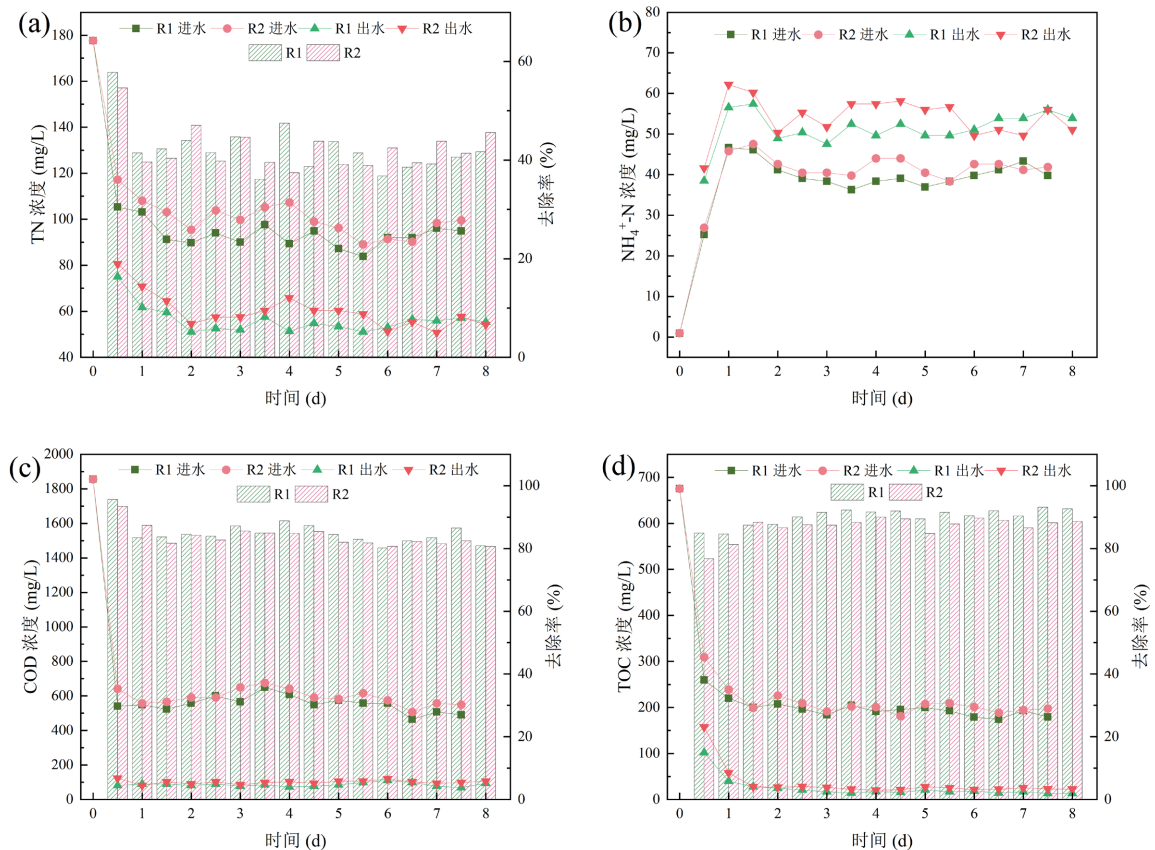


Figure 4. Changes in TN concentration and removal rate (a), $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration (b), COD concentration and removal rate (c), and TOC concentration and removal rate (d) during the SBR semi-continuous flow experiment under a light period of 12 h/12h

图 4. 光照周期为 12 h/12h 时，SBR 半连续实验中 TN 浓度变化和去除率(a)、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度变化(b)、COD 浓度变化和去除率(c)、TOC 浓度变化和去除率(d)

光暗交替条件下，系统对 TN 的去除率整体高于全光照条件，全光照条件下处理一天后的 TN 去除率为 55% 左右，光暗交替条件下仅需 12 h 即可达到相同的处理效果，这可能得益于黑暗条件创造的微厌氧环境，促进了反硝化过程的进行，或部分氮素得以转化为气态氮而从系统中脱除。同时，光暗交替条件下，氨氮浓度稳定在 35~50 mg/L，与全光照相比降幅明显。虽有机物降解初期去除率略低于全光照，但光暗交替下 COD 全程去除率稳定 80% 以上、TOC 稳步升至 90% 左右，实现有机物平稳持续降解与深度

矿化, 与全光照后期效能持平。

3.3. EPS 分析

胞外聚合物是指微生物(主要是细菌)在一定环境条件下释放到其外部环境中的聚合物。这些物质与微生物的细胞内成分具有相似的组成部分, 包括诸如多糖、蛋白质和核酸等聚合物, 能够保护颗粒免受恶劣环境的影响[19]。

不同光照周期下 EPS 各组分的分泌情况如图 5 所示。全光照条件下, 藻菌颗粒污泥体系分泌的胞外蛋白(PN)与胞外多糖(PS)均增加。在 R1 中, 松散结合的胞外多糖(LB-PS)从 $71.7 \pm 11.5 \text{ mg/g-VSS}$ 增加至 $124.0 \pm 2.7 \text{ mg/g-VSS}$; 紧密结合的胞外多糖(TB-PS)从 $214.8 \pm 0.2 \text{ mg/g-VSS}$ 增加至 $349.7 \pm 17.8 \text{ mg/g-VSS}$; 松散结合的胞外蛋白(LB-PN)从 $31.4 \pm 4.5 \text{ mg/g-VSS}$ 增加至 $35.5 \pm 3.6 \text{ mg/g-VSS}$; 紧密结合的胞外蛋白(TB-PN)从 $26.7 \pm 0.7 \text{ mg/g-VSS}$ 增加至 $37.8 \pm 4.6 \text{ mg/g-VSS}$ 。R2 的变化趋势类似。

交替光照条件下, PN 与 PS 同样增加。R1 中 LB-PS 从 $64.8 \pm 20.4 \text{ mg/g-VSS}$ 增加至 $109.2 \pm 0.9 \text{ mg/g-VSS}$; TB-PS 从 $199.0 \pm 14.8 \text{ mg/g-VSS}$ 增加至 $278.1 \pm 2.3 \text{ mg/g-VSS}$; LB-PN 从 $40.9 \pm 1.2 \text{ mg/g-VSS}$ 增加至 $44.9 \pm 0.2 \text{ mg/g-VSS}$; TB-PN 含量出现先升后降的情况, 但整体含量仍有所上升。R2 中 LB-PS 含量从 $50.1 \pm 1.2 \text{ mg/g-VSS}$ 增加至 $110.2 \pm 2.7 \text{ mg/g-VSS}$; TB-PS 从 $221.9 \pm 4.8 \text{ mg/g-VSS}$ 增加至 $285.2 \pm 2.0 \text{ mg/g-VSS}$; LB-PN 从 $37.0 \pm 2.0 \text{ mg/g-VSS}$ 增加至 $41.0 \pm 0.9 \text{ mg/g-VSS}$; TB-PN 从 $37.4 \pm 2.6 \text{ mg/g-VSS}$ 增加至 $43.8 \pm 0.8 \text{ mg/g-VSS}$ 。R2 中 PN 与 PS 的含量均增加。

两种光照周期均刺激了藻菌颗粒污泥 EPS 的分泌, 表现出相似的变化规律: PS 始终占据 EPS 主导地位, 表明 PS 是微生物抵御有机溶剂胁迫的关键防御物质, 同时 TB-EPS 在维持颗粒结构稳定性中发挥主要作用。有研究表明 PS 是构成颗粒状污泥的主要骨骼结构, 具有良好沉降特性的颗粒污泥通常表现出更高的 TB-EPS 含量[20]。与全光照相比, 交替光照下 TB-PS 与 TB-PN 的绝对增长量略低, 表明光照时长可能影响 EPS 的累积效率。Zeng 等[21]研究表明长时间光照促进微藻生长和 EPS 分泌。交替光照下 LB-PS 的增幅更大, 表明黑暗周期可能刺激颗粒表层分泌更多的松散结合多糖, 以应对光照变化带来的氧化应激。由此可见, EPS 的组分优化和分层调控是藻菌共生系统在复杂环境压力下维持颗粒稳定性与功能活性的重要策略。

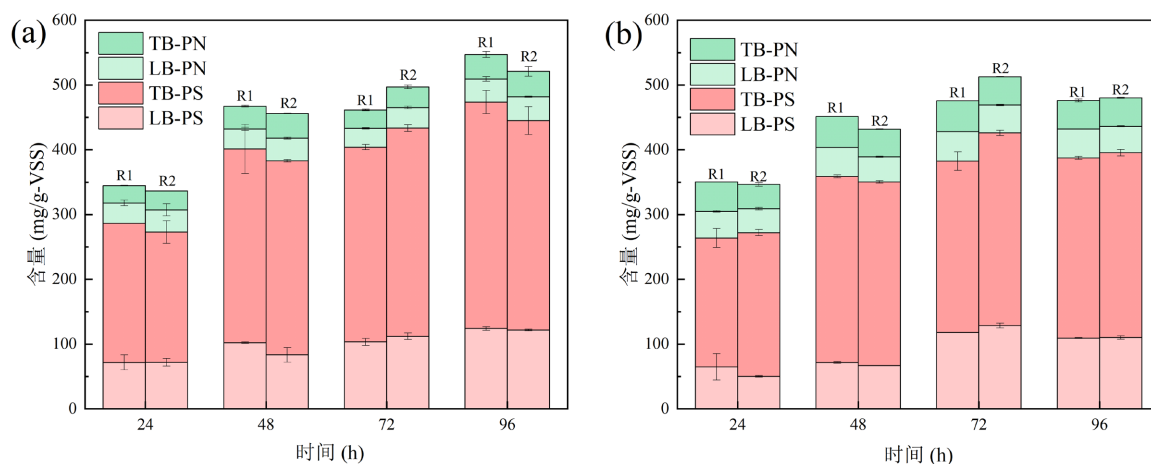


Figure 5. Secretion of EPS components under different light periods: (a) 24 h/0h; (b) 12 h/12h

图 5. 不同光照周期下 EPS 各组分的分泌情况: (a) 24 h/0h; (b) 12 h/12h

3.4. 微生物群落分析

原核生物的群落结构分析如图 6 所示, 全光照条件下, *Proteobacteria* 代表了藻菌颗粒系统门水平上

最显著的细菌类群,这是污水处理中常见的细菌[22]。交替光照下,*Proteobacteria* 丰度下降,*Bacteroidota*、*Cyanobacteria* 和 *Acidobacteriota* 丰度上升。张雪等[23]对垃圾渗滤液处理厂活性污泥的宏基因组分析证实, *Bacteroidota* 是典型的有机污染物降解功能微生物,在系统中丰度达 6.19%,参与难降解有机污染物的分解代谢。在生物接触氧化反应器(BCOR)处理低 C/N 比氨氮废水的研究中发现,酸杆菌门的相对丰度高达 48.39%,是系统的绝对优势菌门, *Acidobacteriota* 门下的三个未命名属是主要的脱氮贡献菌[24]。在纲水平上,全光照条件下,反应器 R1 和 R2 内均以 *Alphaproteobacteria* 为优势菌。交替光照条件下, *Bacteroidia*、*Gammaproteobacteria* 和 *Acidobacteriae* 丰度上升。有研究表明, α -变形菌和 γ -变形菌能够还原硝酸盐和亚硝酸盐,承担着脱氮的重要作用[25]。蓝藻是产氧光颗粒骨架生物,通过其丝状结构缠绕微生物群落,同时分泌 EPS 将细胞和颗粒黏合在一起[26]。

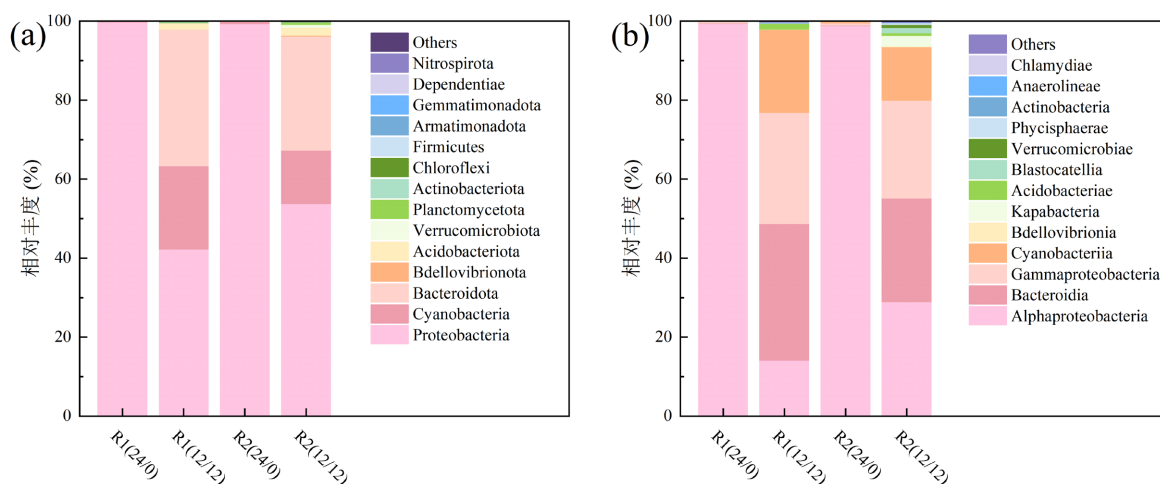


Figure 6. Changes in prokaryotic microbial community under different light periods: (a) at the phylum level; (b) at the class level

图 6. 不同光照周期下原核微生物群落的变化: (a) 门水平; (b) 纲水平

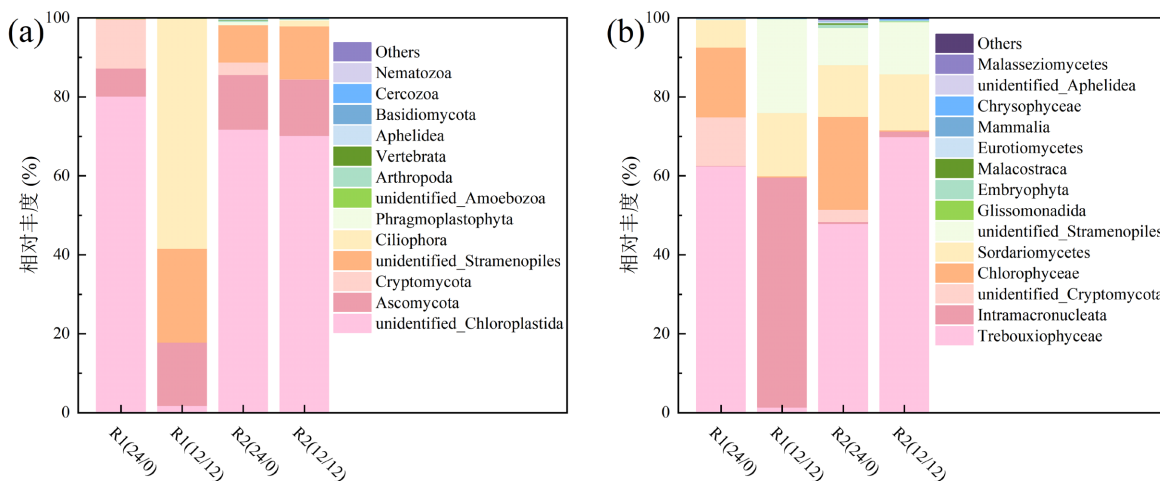


Figure 7. Changes in eukaryotic microbial community under different light periods: (a) at the phylum level; (b) at the class level

图 7. 不同光照周期下真核微生物群落的变化: (a) 门水平; (b) 纲水平

图 7 为 ABGS 在不同光照周期下真核微生物的群落变化。在门水平上, *unidentifed_Chloroplastida* 为

全光照条件下的优势种群, 而交替光照条件下, R2 中的该门类丰度显著上升, 但在 R1 中其丰度显著下降, 说明在同一光照周期内可能存在样本异质性或局部微环境差异。除此之外, *Ascomycota* 和 *Ciliophora* 在交替光照条件下的丰度显著增加。有研究显示子囊菌门类具备降解多种难降解有机污染物和芳香化合物的能力[27]。*Cryptomycota* 则在全光照下较为丰富, 在光暗交替条件下几乎消失, 可能是因为 *Ascomycota* 作为污水处理系统中的优势真菌门类[28], 其较高的相对丰度可能挤压了 *Cryptomycota* 的生存空间。

原核生物和真核生物的 α 多样性指数见表 1, 两种光照条件存在显著差别。从原核生物方面来看, 交替光照下的 Chao1 指数显著高于全光照, 说明物种丰富度大幅提升。同时, Shannon 指数和 Simpson 指数也显著上升, 表明群落均匀度和优势种都发生了明显变化, 群落结构更加复杂且趋于稳定。相比之下, 真核生物的变化则更为温和。以 R2 为例, Chao1 指数从 74.9 略升至 78.3, 但 Shannon 指数从 2.505 降至 1.547, Simpson 指数也从 0.715 降至 0.485, 说明虽然物种数量略有增加, 但群落均匀度下降, 优势种减弱, 可能意味着某些真核类群在光暗交替条件下受到抑制或被原核生物竞争所取代。

综合来看, 光暗交替条件更有利于原核生物多样性和群落结构的优化, 这可能是由于光照周期的变化更贴近自然生态环境, 促进了不同微生物类群的协同或竞争关系, 真核生物则在持续光照下表现出更高的均匀度和优势度, 暗示其可能更适应恒定光照条件。

Table 1. Diversity indices of prokaryotic and eukaryotic organisms in ABGS at the 97% operational taxonomic unit (OTU) level

表 1. ABGS 原核和真核生物测序数据的 97% 操作分类单元(OTU)水平的多样性指数

	样品名称	原核			真核		
		Chao1	Shannon	Simpson	Chao1	Shannon	Simpson
24/0	R1	183.286	0.893	0.157	40	1.881	0.591
	R2	183.75	1.142	0.21	74.929	2.505	0.715
12/12	R1	271.15	5.157	0.937	38	1.752	0.604
	R2	298.875	5.539	0.96	78.25	1.547	0.485

4. 结论

本研究探究了光照周期对藻菌颗粒污泥系统处理含 NMP 废水的效能影响。研究结果表明, 藻菌颗粒污泥系统对 NMP 废水中的有机物具有稳定高效的去除能力, 光暗交替条件显著提升了系统的脱氮效能。藻菌颗粒污泥通过增加 EPS 的分泌提升环境适应性, PS 为 EPS 的主要成分, TB-EPS 在维持颗粒结构稳定性中发挥核心作用。同时, 光照周期改变 ABGS 的微生物群落结构, 光暗交替条件下物种丰富度、群落均匀度和结构稳定性显著提升, 真核生物则更适应全光照环境。

参考文献

- [1] Kumar, P., Verma, S., Kaur, R., Papac, J., Kušić, H. and Štangar, U.L. (2022) Enhanced Photo-Degradation of N-Methyl-2-Pyrrolidone (NMP): Influence of Matrix Components, Kinetic Study and Artificial Neural Network Modelling. *Journal of Hazardous Materials*, **434**, Article ID: 128807. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128807>
- [2] Flick, B., Talsness, C.E., Jäckh, R., Buesen, R. and Klug, S. (2009) Embryotoxic Potential of N-Methyl-Pyrrolidone (NMP) and Three of Its Metabolites Using the Rat Whole Embryo Culture System. *Toxicology and Applied Pharmacology*, **237**, 154-167. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2009.02.024>
- [3] An, Z., Song, P., Li, D., You, X. and Zhang, H. (2025) Biodegradation of N-Methylpyrrolidone (NMP) with a Rotating Algae-Bacterial Biofilm System. *Algal Research*, **90**, Article ID: 104161. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2025.104161>
- [4] Zhao, W., Tian, K., Zhang, L., Tang, Y., Chen, R., Zheng, X., et al. (2025) Harnessing an Algae-Bacteria Symbiosis System: Innovative Strategies for Enhancing Complex Wastewater Matrices Treatment. *Sustainability*, **17**, Article 7104.

- <https://doi.org/10.3390/su17157104>
- [5] Chen, S., Wang, J., Feng, X. and Zhao, F. (2025) Algal-Bacterial Symbiotic Granular Sludge Technology in Wastewater Treatment: A Review on Advances and Future Prospects. *Water*, **17**, Article 1647. <https://doi.org/10.3390/w17111647>
- [6] Ji, B. and Liu, C. (2022) CO₂ Improves the Microalgal-Bacterial Granular Sludge Towards Carbon-Negative Wastewater Treatment. *Water Research*, **208**, Article ID: 117865. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117865>
- [7] Guo, D., Zhang, X., Shi, Y., Cui, B., Fan, J., Ji, B., *et al.* (2021) Microalgal-Bacterial Granular Sludge Process Outperformed Aerobic Granular Sludge Process in Municipal Wastewater Treatment with Less Carbon Dioxide Emissions. *Environmental Science and Pollution Research*, **28**, 13616-13623. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11565-7>
- [8] Hao, L., Wen, L., Ren, S., Shi, C., Shen, Q. and Wang, Q. (2025) Algal-Bacterial Granular Sludge: A Sustainable Solution for Wastewater Treatment for Pollutant Removal and Resource Recovery Towards Circular Economy Implementation. *Process Safety and Environmental Protection*, **201**, Article ID: 107555. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2025.107555>
- [9] Yang, X., Zhao, Z., Zhang, G., Hirayama, S., Nguyen, B.V., Lei, Z., *et al.* (2021) Insight into Cr(VI) Biosorption onto Algal-Bacterial Granular Sludge: Cr(VI) Bioreduction and Its Intracellular Accumulation in Addition to the Effects of Environmental Factors. *Journal of Hazardous Materials*, **414**, Article ID: 125479. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125479>
- [10] Shi, Y., Xu, C., Xu, K., Chen, C., Li, A. and Ji, B. (2025) Metabolic Responses of Microalgal-Bacterial Granular Sludge to Enrofloxacin and Sulfamethoxazole Exposure. *Bioresource Technology*, **429**, Article ID: 132516. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2025.132516>
- [11] Zhang, X., Chen, D., Jiang, N., Hou, X., Li, Y., Wang, Y., *et al.* (2024) New Insights into Algal-Bacterial Sludge Granulation Based on the Tightly-Bound Extracellular Polymeric Substances Regulation in Response to N-Methylpyrrolidone. *Water Research*, **257**, Article ID: 121754. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121754>
- [12] Zhang, X., Guo, S., Xia, Y., Hou, X., Shen, J. and Jiang, X. (2025) Protective Strategies and Self-Adaptive Responses of Algal-Bacterial Granular Sludge System for the Treatment of High-Salinity N-Methylpyrrolidone Wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, **495**, Article ID: 139043. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.139043>
- [13] Jiang, Q., Chen, H., Fu, Z., Fu, X., Wang, J., Liang, Y., *et al.* (2022) Current Progress, Challenges and Perspectives in the Microalgal-Bacterial Aerobic Granular Sludge Process: A Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **19**, Article 13950. <https://doi.org/10.3390/ijerph192113950>
- [14] Zhi, R., Yang, A., Zhang, G., Zhu, Y., Meng, F. and Li, X. (2019) Effects of Light-Dark Cycles on Photosynthetic Bacteria Wastewater Treatment and Valuable Substances Production. *Bioresource Technology*, **274**, 496-501. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.12.021>
- [15] Sun, L., Lei, Y. and Li, H. (2022) Exploring the Fundamental Factors behind Algal-Bacterial Symbiosis and Their Impact on Ecological Interactions. *Frontiers in Environmental Science*, **10**, Article 893412. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.893412>
- [16] Qin, Y., Han, B., Cao, Y. and Wang, T. (2017) Impact of Substrate Concentration on Anammox-UBF Reactors Start-Up. *Bioresource Technology*, **239**, 422-429. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.04.126>
- [17] Su, C., Zheng, P., Lin, X., Chen, W., Li, X., Chen, Q., *et al.* (2019) Influence of Amoxicillin after Pre-Treatment on the Extracellular Polymeric Substances and Microbial Community of Anaerobic Granular Sludge. *Bioresource Technology*, **276**, 81-90. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.12.104>
- [18] Lima, S., Cosenza, A., Caputo, G., Grisafi, F. and Scargiali, F. (2024) Utilization of Native Chlorella Strain in Laboratory-Scale Raceway Reactor for Synthetic Wastewater Treatment: A Study in Batch and Continuous Modes with Multi-Substrate Modeling. *Journal of Water Process Engineering*, **60**, Article ID: 105145. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105145>
- [19] Liu, Z., Liu, J., Zhao, Y., Zhang, S., Gao, M., Wang, J., *et al.* (2023) Understanding the Effects of Algae Growth on Algae-Bacterial Granular Sludge Formation: From Sludge Characteristics, Extracellular Polymeric Substances, and Microbial Community. *Journal of Cleaner Production*, **410**, Article ID: 137327. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137327>
- [20] Khan, A.Z., Li, Z., Huang, G., Liu, L., Jiang, F., Hu, Z., *et al.* (2026) Recent Advances in Microalgal-Bacterial Granular Sludge Systems for Sustainable Aquaculture Wastewater Treatment: Mechanisms, Optimization, and Future Perspectives. *Aquaculture*, **613**, Article ID: 743304. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2025.743304>
- [21] Zeng, W., Ma, S., Huang, Y., Xia, A., Zhu, X., Zhu, X., *et al.* (2022) Bifunctional Lighting/supporting Substrate for Microalgal Photosynthetic Biofilm to Bio-Remove Ammonia Nitrogen from High Turbidity Wastewater. *Water Research*, **223**, Article ID: 119041. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119041>
- [22] Zhang, T., Shao, M. and Ye, L. (2012) 454 Pyrosequencing Reveals Bacterial Diversity of Activated Sludge from 14 Sewage Treatment Plants. *The ISME Journal*, **6**, 1137-1147. <https://doi.org/10.1038/ismej.2011.188>
- [23] 张雪, 乔雪姣, 苏佳, 等. 垃圾渗滤液处理厂活性污泥微生物种群结构和功能分析[J]. 北京大学学报自然科学版,

2021, 57(5): 927-937.

- [24] Yue, X., Liang, J., Lin, Y., Xiao, X., Chen, L., Che, K., *et al.* (2025) Acidobacteria as the Dominant Microorganism on the Nitrogen-Removal Wastewater Treatment with a Low Chemical Oxygen Demand/Ammonium Nitrogen Ratio in Biological Contact Oxidation Reactor. *Journal of Environmental Management*, **373**, Article ID: 123891. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123891>
- [25] Ye, L., Shao, M., Zhang, T., Tong, A.H.Y. and Lok, S. (2011) Analysis of the Bacterial Community in a Laboratory-Scale Nitrification Reactor and a Wastewater Treatment Plant by 454-Pyrosequencing. *Water Research*, **45**, 4390-4398. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.05.028>
- [26] Milferstedt, K., Kuo-Dahab, W.C., Butler, C.S., Hamelin, J., Abouhend, A.S., Stauch-White, K., *et al.* (2017) The Importance of Filamentous Cyanobacteria in the Development of Oxygenic Photogranules. *Scientific Reports*, **7**, Article No. 17944. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-16614-9>
- [27] Wang, M., Li, J., Ning, S., Fu, X., Wang, X. and Tan, L. (2022) Simultaneously Enhanced Treatment Efficiency of Simulated Hypersaline Azo Dye Wastewater and Membrane Antifouling by a Novel Static Magnetic Field Membrane Bioreactor (SMFMBR). *Science of the Total Environment*, **821**, Article ID: 153452. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153452>
- [28] Ramzan, M.N., Shen, D., Wei, Y., Raza, B., Yuan, H., Emmanuel, A., *et al.* (2025) A Synergistic Role of Photosynthetic Bacteria and Fungal Community in Pollutant Removal in an Integrated Aquaculture Wastewater Bioremediation System. *Biology*, **14**, Article 959. <https://doi.org/10.3390/biology14080959>