

# 低温条件下菌藻颗粒污泥脱氮除磷机制研究综述

王思亚 姜龙骁 刘晓喜 衣俊霖 侯博文  
大连海洋大学

DOI:10.32629/eep.v9i2.3073

**[摘要]** 针对全球水环境质量下降与水处理成本过高问题,寻找高效与节能的污水处理技术成为研究热点。菌藻颗粒污泥(ABGS)工艺通过构建了细菌与微藻的共生体系。ABGS具有节能降耗、回收资源,被认为是下一代污水处理技术的重要方向。但低温环境会明显抑制ABGS工艺的脱氮除磷效果,所以ABGS在寒冷地区和季节难以稳定运行的主要瓶颈。本文系统介绍了ABGS的脱氮除磷原理,分析了温度、光照、进水基质和pH等关键因素对ABGS处理效果的影响。重点探讨了低温对ABGS工艺在微生物代谢活性、菌藻协同作用、颗粒结构稳定性,以及关键功能微生物竞争机制的限制。

**[关键词]** 低温; 菌藻颗粒污泥; 脱氮除磷

**中图分类号:** TU992.3 **文献标识码:** A

## A Review on the Nitrogen and Phosphorus Removal Mechanism of Microbial-Algal Granular Sludge under Low Temperature Conditions

Siya Wang Longxiao Jiang Xiaoxi Liu Junlin Yi Bowen Hou  
Dalian Ocean University

**[Abstract]** In response to the global decline in water environmental quality and the high cost of water treatment, the search for efficient and energy-saving wastewater treatment technologies has become a research hotspot. The Algae-Bacterial Granular Sludge (ABGS) process constructs a symbiotic system of bacteria and microalgae. ABGS is known for its energy saving and resource recovery and is considered an important direction for the next generation of wastewater treatment technology. However, low temperatures significantly inhibit the nitrogen and phosphorus removal efficiency of the ABGS process, making it difficult to stabilize the operation of ABGS in cold regions and seasons, which is the main bottleneck. This paper systematically introduces the principle of nitrogen and phosphorus removal by ABGS and analyzes the effects of key factors such as temperature, light, influent matrix, and pH on the treatment efficiency of ABGS. It focuses on the limitations of low temperature on the microbial metabolic activity, algae-bacteria synergy, granule structural stability, and the competitive mechanism of key functional microorganisms in the ABGS process.

**[Key words]** low temperature; Algae-Bacteria Granular Sludge; nitrogen and phosphorus removal

### 1 引言

由于经济社会快速发展,水环境污染已经成为全球范围内十分突出、备受关注的议题,而传统颗粒污泥(CAS)工艺虽然长期以来被用来处理城市污水,但是其有能耗高、碳排放量大、产生大量剩余污泥等重大缺陷<sup>[1]</sup>。与此形成极佳补充的是好氧颗粒污泥(AGS)工艺,其处理效率高、占地面积小<sup>[2]</sup>,但也必须客观看待其污染物去除途径与CAS工艺基本相同,因此AGS只能缓解而不能彻底解决CAS工艺的缺点。近年来微藻-细菌共生体在污水处理领域得到了学界极大关注<sup>[3]</sup>。藻类与细菌通过底物交换、互相促进生长的方式实现了污水处理的低能耗、高效率去除营养物质<sup>[4]</sup>。不过,出水中藻类分离困难仍然是目前最突出的新问

题。但是,由细菌和藻类自聚集形成的ABGS不仅保留了AGS的优点,还提高了营养盐去除能力并增强了系统稳定性<sup>[5]</sup>。尽管如此,ABGS在低温条件下高效、稳定运行仍然是当前需要攻克的重要课题。

我国北方地区污水处理厂普遍面临冬季水温低(可降至5°C)的挑战,低温会显著抑制微生物的生长与代谢,导致污染物去除效率大幅下降<sup>[6]</sup>。研究表明,当温度低于15°C时,COD、氨氮、总氮和总磷的去除效率均有不同程度降低<sup>[7-9]</sup>。ABGS作为一种可实现水-能源-资源回收且温室气体排放低的新型环保工艺,在理论上具有更高的低温耐受潜力<sup>[10]</sup>。然而,目前对低温条件下ABGS系统中细菌与藻类的代谢协同规律、二者在氮磷转化中的差异化

贡献以及系统的内在响应机制尚缺乏系统深入的认识。因此,深入探究低温下菌藻耦合系统的脱氮除磷机制,对于优化工艺参数、提升系统低温稳定性具有重要的理论意义和应用价值。

## 2 菌藻耦合工艺及其脱氮除磷机制

菌藻耦合工艺通过强化细菌与微藻间的协同作用,融合了好氧颗粒污泥与微藻技术的双重优势,有效提高了代谢效率。在这个共生系统中,微藻利用废水中的有机物、氮、磷和CO<sub>2</sub>进行生长,并通过光合作用产生O<sub>2</sub>,促进了细菌对有机物的降解,从而显著减少了对曝气的需求<sup>[11]</sup>。与传统生物法相比,该工艺在能耗、污染物去除、资源回收和生态安全等维度展现出显著优势<sup>[12]</sup>。

### 2.1 脱氮机制

ABGS中氮的去除主要通过以下几种途径协同完成:藻类与细菌对氮的同化吸收也是ABGS脱氮的重要途径。其中,细菌对NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N的同化吸收过程缓慢且需要消耗能量<sup>[13]</sup>;相比之下,藻类在生长过程中能有效吸收氮,且优先利用NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N。当NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N耗尽时,藻类可直接利用NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N作为氮源进行吸收。硝化-反硝化:藻类光合作用产生的O<sub>2</sub>为好氧硝化菌提供了充足的电子受体,将NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N转化为NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N。在黑暗或颗粒内部缺氧/厌氧微环境中,反硝化菌将NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N逐步还原为N<sub>2</sub>,完成最终的脱氮过程。藻类的存在为硝化过程提供了关键氧气,而昼夜交替形成的DO梯度变化自然促进了硝化-反硝化的偶联<sup>[14,15]</sup>。

### 2.2 除磷机制

ABGS中磷的去除途径包括生物吸收和无机沉淀:微生物过量吸收:聚磷菌(PAOs)在好氧条件下过量吸收磷;而藻类在营养充足时会进行“奢侈性磷吸收”,将超过自身生长需求的磷储存起来<sup>[16]</sup>。在黑暗/厌氧阶段,PAOs释磷,这些磷可被藻类直接吸收利用,形成了独特的协同除磷路径<sup>[17]</sup>。化学沉淀:藻类光合作用引起的pH升高,促进了可溶性磷酸盐与金属离子(如Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>)发生化学沉淀,这也是除磷的重要补充途径<sup>[18]</sup>。

## 3 ABGS的主要影响因素

### 3.1 温度

温度通过影响酶活性和物质溶解度,直接调控菌藻的生长代谢速率。微藻最适生长温度为20~30℃,低于此范围处理效果显著降低<sup>[19]</sup>。温度是驱动ABGS内微生物群落演替的主要驱动力,直接影响着菌藻共生关系的稳定性。研究证实,30℃时COD去除率提升,22℃时特定菌群富集有利于除磷<sup>[20]</sup>。季节性温度变化会导致系统内微生物的生态位分化,夏季(21~23℃)的处理效能和藻类生物量显著高于冬季(7~10℃)。微藻的存在有助于将群落组装机制从随机漂移转变为确定性选择,增强系统的长期稳定性。

### 3.2 光照条件

光照强度与光照周期是驱动藻类光合作用的核心参数。适宜的光照强度(如120 μmol/(m<sup>2</sup>·s))能促进微藻增殖、提升颗粒稳定性和氮去除性能。当光照强度过高时会引发光抑制,所以并非光照强度越强越好。光照周期同样至关重要,过长或过短都会对藻类生长和代谢产生不利影响。

### 3.3 进水基质

进水碳氮比、氮磷比及有机负荷率等对ABGS脱氮除磷性能有显著影响。适宜的COD/N(如5:1)和N/P(5~30)有利于菌藻同步吸收营养盐,实现最佳去除效果。适度的有机负荷率提升能够促进胞外聚合物(EPS)及藻酸盐类物质的合成,有利于颗粒结构的稳定。

### 3.4 pH

关于pH值对ABGS特性的影响已有十分清楚、扎实的研究结论:进水pH直接、明确地决定了颗粒污泥的群落结构及物理形态,即酸性条件有利于结构松散的丝状菌过度增殖并占主导地位,而中性至碱性条件更有利于致密、稳定的细菌颗粒形成。更重要的是,光照强度可通过调控微藻的代谢活动间接影响系统pH,具体而言,光照增强时微藻光合作用增强,大量消耗水中无机碳,因此废水pH可显著升高(达8.0~9.8)。但也必须注意到,微藻驱动的高pH环境虽有利于磷酸盐的化学沉淀,却同时抑制PAOs的代谢活性,故有可能弱化生物除磷效果<sup>[18]</sup>。

## 4 低温对ABGS脱氮除磷的影响

低温对ABGS系统的主要影响机制十分清楚、明确:即低温强烈抑制微生物的代谢活性,其机理可很自然、有层次地分解为两部分。首先,低温使细菌及藻类体内各种酶的催化效率降低,因此底物降解、硝化、反硝化、光合作用诸生化反应的速率都急剧下降,而细胞分裂及生物合成速率减小又迫使微生物把更多能量用于维持细胞膜的流动性,故而系统污染物降解能力被严重弱化。具体到微藻,低温对光合作用的抑制极其典型:光系统II活性及电子传递效率下降,卡尔文循环中关键酶Rubisco活性降低,叶绿素合成受抑而降解加速,最终导致藻类生物量减少,系统供氧、固碳能力均大大削弱。

ABGS系统中菌藻协同作用减弱、颗粒化结构稳定性下降两个问题彼此连锁、互为因果:协同作用减弱主要是因为藻类产氧不足,故颗粒内部缺氧程度加重,好氧细菌活性被抑制,同时细菌呼吸产生的CO<sub>2</sub>量减少,限制了藻类的碳源供应,营养盐循环速率也相应降低,因此整体处理效率自然下降。颗粒化结构稳定性受损的根本原因则是低温抑制EPS分泌并改变其组成,特别是蛋白类EPS的含量减少,直接导致颗粒机械强度及疏水性降低,水力剪切敏感性增大,丝状细菌增殖风险提高,从而引起颗粒解体、沉降性能恶化。更严重的是,低温使液体粘度升高、分子扩散系数减小,颗粒内部底物限速、产物积累的问题愈加突出。最终,有机物去除、脱氮、除磷效率显著下降,且反硝化不完全可能导致N<sub>2</sub>O等温室气体排放比例增加,严重损害系统的综合处理效能。

此外,低温下底物亲和力的降低是抑制微生物活性进而降低营养物质去除效率的十分明确而重要的原因。PAOs对强化生物除磷有举足轻重的作用,但毋庸讳言,PAOs对低温极为敏感。在藻类和细菌的混合培养中,低温会明显降低硝酸盐的亲合力及其利用效率,但NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N亲合力对温度降低的响应始终小于NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N。藻类在低温下会合成更多脂质,且低温并不干扰其碳代

谢及光合作用过程,因此可以合理地认为,藻类比细菌更耐受低温。不过,也必须正视一个尚未厘清的问题:低温条件下藻类、PAOs、反硝化聚磷菌、硝化细菌和反硝化细菌之间营养物质的竞争动态。特别是温度变化如何影响微生物群落结构及代谢途径,以及具体而言,低温对藻类磷同化、细菌磷积累、藻类奢侈性磷吸收(即藻类吸收的磷超过其生长所必需量)等诸种过程的实际影响,都值得系统研究。

## 5 结论与展望

ABGS工艺为污水处理提供了高效节能选择,但缓解低温对ABGS工艺的限制仍是主要难题。低温会抑制微生物的整体代谢,破坏菌藻之间的共生关系与影响颗粒污泥的结构,功能菌群的竞争平衡,最终导致ABGS的脱氮除磷效果下降。

针对上述问题,可以从三方面进行调整工艺:(1)定向调控功能性菌群。通过调整运行参数,富集耐冷功能菌群,提高系统对低温耐受能力。(2)优化工艺参数。优化光照强度与光暗比等,调整反应器结构与运行方式,加强菌藻的协同作用,提升低温下的去除效率。(3)评估系统稳定性与运行风险。通过中试实验检测,低温条件下ABGS长期运行的稳定性与运行成本,为规模化应用提供技术依据

## [参考文献]

[1] Ji B, Liu Y. Assessment of Microalgal-Bacterial Granular Sludge Process for Environmentally Sustainable Municipal Wastewater Treatment[J]. ACS ES&T Water, 2021, 1(12): 2459-2469.

[2] He Q, Xie Z, Fu Z, et al. Interaction and removal of oxytetracycline with aerobic granular sludge[J]. Bioresource Technology, 2021, 320: 124358.

[3] 金忠友, 陈志宏, 郑政. 水环境菌藻共生相互作用研究进展[J]. 环境污染与防治, 2023, 45(06): 870-874+880.

[4] Li L, Chai W, Sun C, et al. Role of microalgae-bacterial consortium in wastewater treatment: A review[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 360: 121226.

[5] Huang W, Li B, Zhang C, et al. Effect of algae growth on aerobic granulation and nutrients removal from synthetic wastewater by using sequencing batch reactors[J]. Bioresource Technology, 2015, 179: 187-192.

[6] Du L, Trinh X, Chen Q, et al. Enhancement of microbial nitrogen removal pathway by vegetation in Integrated Vertical-Flow Constructed Wetlands (IVCWs) for treating reclaimed water[J]. Bioresource Technology, 2018, 249: 644-651.

[7] Sani A, Scholz M, Bouillon L. Seasonal assessment of experimental vertical-flow constructed wetlands treating domestic wastewater[J]. Bioresource Technology, 2013, 147: 585-596.

[8] Taylor C R, Hook P B, Stein O R, et al. Seasonal effects of 19 plant species on COD removal in subsurface treatment wetland microcosms[J]. Ecological Engineering, 2011, 37(5): 703-710.

[9] Zhao Z, Xu C, Zhang X, et al. Addition of iron materials for improving the removal efficiencies of multiple contaminants from wastewater with a low C/N ratio in constructed wetlands at low temperatures[J]. Environ Sci Pollut Res Int, 2019, 26(12): 11988-11997.

[10] Gao X, Xu Z, Peng Y, et al. The nitrification recovery capacity is the key to enhancing nitrogen removal in the AOA system at low temperatures[J]. Science of The Total Environment, 2022, 818: 151674.

[11] Shi Y, Xu C, Ji B, et al. Microalgal-bacterial granular sludge can remove complex organics from municipal wastewater with algae-bacteria interactions[J]. Communications Earth & Environment, 2024, 5(1): 347.

[12] 张静雯, 殷金悦, 霍佳琪. 生态修复领域菌藻共生体系研究进展[J]. 中国沙漠, 2025, 45(3): 93-101.

[13] Huang X, Weisener C G, Ni J, et al. Nitrate assimilation, dissimilatory nitrate reduction to ammonium, and denitrification coexist in *Pseudomonas putida* Y-9 under aerobic conditions[J]. Bioresource Technology, 2020, 312: 123597.

[14] Purba L D A, Ibiyeye H T, Yuzir A, et al. Various applications of aerobic granular sludge: A review[J]. Environmental Technology & Innovation, 2020, 20: 101045.

[15] Marin D, Posadas E, Cano P, et al. Seasonal variation of biogas upgrading coupled with digestate treatment in an outdoors pilot scale algal-bacterial photobioreactor[J]. Bioresource Technology, 2018, 263: 58-66.

[16] Rezvani F, Sarrafzadeh M-H. Autotrophic granulation of hydrogen consumer denitrifiers and microalgae for nitrate removal from drinking water resources at different hydraulic retention times[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 268: 110674.

[17] Ji B, Zhang M, Wang L, et al. Removal mechanisms of phosphorus in non-aerated microalgal-bacterial granular sludge process[J]. Bioresource Technology, 2020, 312: 123531.

[18] Li Z, Wang J, Chen X, et al. Insight into aerobic phosphorus removal from wastewater in algal-bacterial aerobic granular sludge system[J]. Bioresource Technology, 2022, 352: 127104.

[19] 萧铭明, 黄翔鹤, 黄强. 温度、照度和接种量对钝顶螺旋藻去除酒精废水氮和磷的影响[J]. 广东海洋大学学报, 2019, 39(3): 7.

[20] Ji B, Zhu L, Wang S, et al. Temperature-effect on the performance of non-aerated microalgal-bacterial granular sludge process in municipal wastewater treatment[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 282: 111955.

## 作者简介:

王思亚(1999--),女,满族,辽宁省葫芦岛市人,硕士研究生在读,研究方向:水处理。