

赵学宇, 任淑静, 郭宁, 等. 微藻生物系统去除抗生素和 ARGs 的研究进展[J]. 净水技术, 2024, 43(4):28-33, 45.

ZHAO X Y, REN S J, GUO N, et al. Research progress of microalgal biological system for antibiotics and ARGs removal[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(4):28-33, 45.

微藻生物系统去除抗生素和 ARGs 的研究进展

赵学宇, 任淑静, 郭宁, 张欢欢, 贾玉莹, 朱兆亮*

(山东建筑大学市政与环境工程学院, 山东济南 250101)

摘要 抗生素与抗生素抗性基因(ARGs)污染严重危害人类健康,微藻生物技术在处理抗生素废水过程中表现出良好的效果。文章首先总结了微藻对于不同种类抗生素的去除机理,包括生物吸附、生物累积、生物降解、光生物降解和水解挥发5种。分析了微藻在去除抗生素过程中的重要影响因素,包括 pH、水力停留时间、光照、抗生素的种类与浓度和微藻的种类。并总结了微藻对 ARGs 的去除机制,包括移动基因元件的去除及活性氧自由基的猝灭。最后,文章指出了微藻处理抗生素废水过程中仍然存在的问题,进一步明确了今后微藻生物技术处理抗生素废水的重点研究方向。

关键词 抗生素废水 微藻 抗生素抗性基因(ARGs) 去除机理 影响因素

中图分类号: X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2024)04-0028-07

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.04.004

Research Progress of Microalgal Biological System for Antibiotics and ARGs Removal

ZHAO Xueyu, REN Shujing, GUO Ning, ZHANG Huanhuan, JIA Yuying, ZHU Zhaoliang*

(School of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

Abstract Antibiotics and antibiotic resistance genes (ARGs) pollution pose a serious threat to human health, and microalgae biotechnology has shown good results in the treatment of antibiotic wastewater. This paper summarizes the removal mechanism of different kinds of antibiotics by microalgae, including biosorption, bioaccumulation, biodegradation, photodegradation and hydrolysis volatilization. The important factors affecting the removal of antibiotics by microalgae were analyzed, including pH, hydraulic retention time, light, the types and concentrations of antibiotics, and the species of microalgae. And the removal mechanism of ARGs by microalgae was summarized, including removal of mobile gene elements and quenching of reactive oxygen species. Finally, the paper points out the existing problems in the treatment of antibiotic wastewater by microalgae, and further clarifies the key research directions for the treatment of antibiotic wastewater by microalgae biotechnology in the future.

Keywords antibiotic wastewater microalgae antibiotic resistance genes (ARGs) removal mechanism influence factor

自1929年青霉素被发现后,抗生素作为一种抗菌药物被广泛用于治疗一些感染性疾病,以及被用来促进家禽等的生长发育,在治疗一些细菌类疾病、进行器官移植、外科手术等方面发挥了不可磨灭的作用。随着抗生素的滥用,越来越多的抗生素进入

了环境中,这些抗生素严重破坏了生态平衡,同时抗生素驱动的抗生素耐药基因(ARGs)和抗生素耐药细菌(ARB)逐渐增加^[1]。此外,抗生素会进入生态循环,最终在人体内进行生物富集,对人类身体健康造成严重威胁^[2]。目前,被应用于废水处理的方法有物理法、化学法和生物法,包括生物炭吸附、高级氧化技术、膜滤技术、光催化以及生物处理等方法。其中微藻生物处理技术逐渐引起世界各地研究人员的关注。环境中存在着大量的微藻,其作为一种可再生的生物资源^[3],不仅可以提供氧气,还可以吸收氮磷等元素^[4],净化水源,同时还能够去除抗生素等污染物,不会对环境造成二次污染,因此,利用

[收稿日期] 2023-04-14

[基金项目] 山东省重大科技创新项目(2020CXGC011203);中国博士后基金(2019M662398);国家自然科学基金(52000124);山东省自然科学基金(ZR2019BEE052)

[作者简介] 赵学宇(2000—),男,硕士,研究方向为水处理理论与技术,E-mail:3179412878@qq.com。

[通信作者] 朱兆亮(1975—),男,博士,教授,研究方向为水处理理论与技术,E-mail:262263065@qq.com。

微藻生物处理技术处理抗生素废水具有其独特优势和发展前景。然而微藻系统去除抗生素和 ARGs 的过程复杂,去除机理仍需进一步研究。本文系统地阐述了微藻对不同种类抗生素的去除机制,总结了抗生素去除的重要影响因素,介绍了微藻对 ARGs 的去除效率,为抗生素废水的有效去除提供科学基础。

1 几种典型抗生素的去除机理

微藻系统可以有效地去除几种典型的抗生素。例如姜现静等^[5]研究发现,微藻对氟喹诺酮类抗生素去除率达到 60%~90%;韦艳玲^[6]研究发现,微藻对氟苯尼考去除率达到 70%~95%;另外,杨俊^[7]研究发现,微藻对四环素的去除效率可以达到 75%~95%。不同抗生素的物理化学性质大不相同,因此,微藻对抗生素的去除机理也是多样的,包括生物吸附、生物降解、生物累积、光生物降解和水解挥发 5 种(图 1)。其中最主要的去除方式是生物吸附、生物降解和生物累积。生物吸附是指由于静电引力的作用,微藻分泌的胞外聚合物(EPS)吸附抗生素的过程。生物降解是指微藻细胞通过酶促反应使抗生素分解为小分子降解产物的过程,这个过程可以发生在细胞内也可以发生在细胞外^[8]。生物累积是指抗生素在微藻细胞内进行积累富集,从而实现抗生素去除的过程。光生物降解是指抗生素在太阳光的照射下发生的降解过程,包括藻类不参与的直接光解与藻类参与的间接光解。另外,水解也是藻类去除抗生素的一种方式。研究^[9]表明,微藻系统中

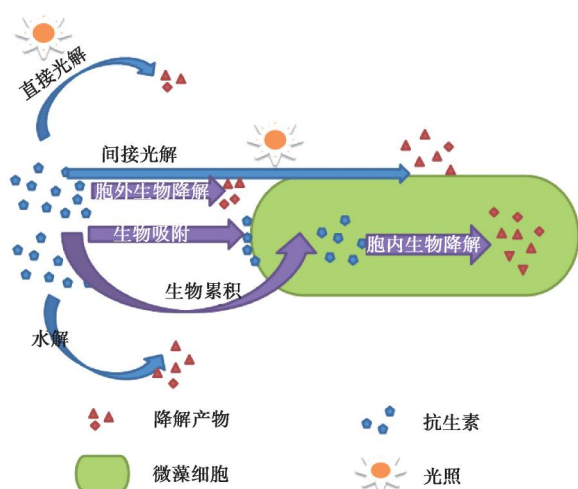


图 1 微藻系统中抗生素的去除机理

Fig. 1 Mechanism of Antibiotics Removal in Microalgae Systems

抗生素是通过各种组合机制来去除的,其中生物吸附是微藻处理抗生素废水过程中最常见的方式,生物降解已被证明是微藻生物处理技术中去除抗生素的最有效机制。

1.1 氟喹诺酮类抗生素

氟喹诺酮类抗生素的去除机制包括生物降解、光生物降解、生物累积、生物吸附。Xie 等^[10]在研究中发现环丙沙星被衣藻去除,其去除机理主要为生物降解,约占去除总量的 65%。Hom-Diaz 等^[11]在研究中证明莱茵衣藻去除诺氟沙星的过程中光生物降解约占 78%,是最主要的去除方式。Kiki 等^[12]的团队研究证明,左氧氟沙星被小球藻去除的 40 d 中,生物降解与生物累积是去除左氧氟沙星的主要方式,约占 82%,生物吸附仅占 1%~2%。研究^[6]表明,氟喹诺酮类抗生素的去除中,生物累积与生物吸附所占比重较小,一般为光生物降解或生物降解。

1.2 β -内酰胺类抗生素

头孢拉定和头孢他啶是典型的 β -内酰胺类抗生素,Xiao 等^[13]研究中发现小球藻去除头孢拉定的能力很强,在带有小球藻的试验组中,处理 24 h 后头孢拉定的去除率达 $41.47\% \pm 0.62\%$,为无微藻对照组的去除率的 3.4 倍,去除机制主要为生物降解。蛋白核小球藻对头孢他啶最主要的去除机理是生物吸附与生物降解,去除效率可以达到 93%。对于 β -内酰胺类抗生素,最主要的去除机理为生物降解^[13],且与无微藻系统相比,去除率大幅提升。

1.3 磺胺类抗生素

研究指出,磺胺类抗生素去除的主要机理为光生物降解和生物降解。例如 Garcia-Rodríguez 等^[14]利用角果藻对磺胺吡啶处理 21 d 后,发现暴露于光照下的磺胺吡啶去除率为 45%,而没有暴露于光照下的去除率仅为 10%,这说明角果藻和光照共同导致了磺胺吡啶的去除。Xie 等^[10]研究发现,衣藻可以有效去除磺胺嘧啶,去除效率可以达到 35.6%。磺胺类抗生素在光照条件下的去除率显著高于无光照条件,有效地说明了磺胺类抗生素去除的主要机理为光生物降解和生物降解^[6]。

1.4 大环内酯类抗生素

大环内酯类抗生素常见的有红霉素、阿奇霉素等。Wang 等^[15]在研究中发现,生物降解、生物吸附、水解和光生物降解都是导致红霉素去除的途径。在质量浓度为 1、10 $\mu\text{g/L}$ 和 100 $\mu\text{g/L}$ 的红霉素条

件下,去除效率分别达到 94.18%、80.59% 和 49.60%,其中生物降解与生物吸附的去除率最大达到了 57.87%,其次是水解达到了 34.13%,光生物降解仅占约 5%。Kiki 等^[12]研究发现,雨生小球藻在 40 d 内去除阿奇霉素时去除效率最大能达到 78%,最主要的去除机制是生物降解。大环内酯类抗生素的去除一般包括生物降解、生物吸附与水解,其中最重要的去除机制是生物降解^[12]。

2 微藻处理抗生素废水的影响因素

2.1 微藻种类

不同的微藻对抗生素的去除效果不同,因此,微藻种类是抗生素废水处理效率的重要影响因素。Guo 等^[16]研究发现,头孢类抗生素 7-氨基头孢烷酸(7-ACA),在分别用小球藻、衣藻和麦克属类进行生物吸附时,小球藻表现出了更好的吸附能力,吸附生物量达到了 4.74 mg/g,衣藻和麦克属类吸附的生物量仅为 3.09 mg/g 和 2.95 mg/g。

2.2 抗生素种类和浓度

藻类对于不同种抗生素的耐受能力不同,因此对抗生素的去除能力也有差异。Chen 等^[17]研究发现,使用普通小球藻去除恩诺沙星、磺胺二甲嘧啶和磺胺嘧啶时,恩诺沙星的去除率最高,可达 53%~73%,磺胺二甲嘧啶的去除率可达 16%~33%,磺胺嘧啶的去除率最低,仅为 11%~24%。Xiao 等^[13]在研究中发现,蛋白核小球藻对阿莫西林和诺氟沙星的去除率相差极大,对阿莫西林的去除率可以达到 91.13%,然而对诺氟沙星的去除率仅有 7.89%。因此,藻类去除抗生素废水有较强的特异性,在面对不同种类的抗生素选择合适的藻类能够显著提高去除效率。另外,藻类对不同浓度的抗生素的去除效果也不尽相同。例如,Xiong 等^[18]研究发现,磺胺二甲嘧啶质量浓度从 0.025 mg/L 增至 0.25 mg/L 时,斜生栅藻对其去除率从 31% 增至 62%。Cheng 等^[19]

发现随着替米考星初始质量浓度的增加(从 0.01 mg/L 增加到 50 mg/L),其去除效率也显著升高,由 90.2% 增加到 99.8%。这是由于微藻细胞内外浓度差增大,促进了替米考星在细胞表面的吸收。

2.3 水力停留时间(HRT)

HRT 是微藻去除抗生素过程中一个重要的因素,一般来说,用于光生物反应器废水处理的 HRT 为 2~10 d^[20]。较长的 HRT 更有利于微藻充分地进行生物吸附、生物降解等活动,进而提高对抗生素的去除效率。例如,Norvill 等^[21]研究发现,高效率藻池中的 HRT 从 4 d 增至 7 d 时,四环素的去除率由 93% 提高至 99%。Peng 等^[22]研究发现,对于 HRT 为 1 d 的生物膜光生物反应器,磺胺嘧啶、磺胺二甲嘧啶和磺胺甲恶唑的去除率分别为 61%、50% 和 60.8%,而 HRT 为 2 d 时,其去除率分别增至 79.2%、76.7% 和 82.1%。

2.4 pH

pH 是影响藻类吸附去除抗生素的重要因素,例如,Daneshvar 等^[23]研究发现四尾藻在 pH 值为 2 时对四环素的去除效率接近 0,当 pH 值为 8 时去除效率可以达到 49%,pH 继续升高后去除效率会降低至 30%。该结果可能是 pH 改变了微藻细胞膜的电荷,同时对抗生素的电离也产生影响,具体机制仍需进一步研究。

2.5 光照

光照强度会影响微藻的生长,进而影响废水中抗生素的去除。较高的光照会促进微藻对抗生素的去除,但是过高的光照强度会损害微藻叶绿体的光系统,降低微藻的代谢活动和抗生素的去除效率。Du 等^[24]在研究中发现,在 5 500 Lux 下的头孢拉定和 8 500 Lux 下的阿莫西林的去除率可达 60.89% 和 37.08%,是 2 500 Lux 下的两倍左右。

表 1 总结了微藻去除抗生素过程中的影响因素。

表 1 微藻去除抗生素过程中的影响因素
Tab. 1 Influence Factors of Antibiotics Removal by Microalgae

影响因素	抗生素	工艺条件	去除机理	去除率	参考文献
微藻种类	7-ACA	小球藻	生物吸附	约 65%	[16]
	7-ACA	衣藻	生物吸附	约 78%	
	恩诺沙星	斜生栅藻	生物降解	25%	[25]
	恩诺沙星	墨西哥衣藻	生物降解	23%	
	恩诺沙星	小球藻	生物降解	26%	

(续表1)

影响因素	抗生素	工艺条件	去除机理	去除率	参考文献
抗生素浓度	恩诺沙星	多孢乌球菌	生物降解	18%	[18]
	恩诺沙星	微茫藻	生物降解	20%	
	磺胺甲恶唑	0. 025 mg/L	生物吸附、生物积累、生物降解	28%	
		0. 075 mg/L		29%	
		0. 125 mg/L		35%	
		0. 175 mg/L		35%	
		0. 25 mg/L		47%	
	磺胺二甲嘧啶	0. 025 mg/L	生物吸附、生物积累、生物降解	31%	[18]
		0. 075 mg/L		35%	
		0. 125 mg/L		49%	
		0. 175 mg/L		55%	
		0. 25 mg/L		62%	
HRT	替米考星	0. 01 mg/L	生物吸附	90. 2%	[19]
		50 mg/L		99. 8%	
	四环素	4 d	光解、生物降解、生物吸附、水解、光降解	93%	[21~22]
		7 d		99%	
	磺胺嘧啶	1 d		61%	
		2 d		79. 2%	
	磺胺二甲嘧啶	1 d		50%	
		2 d		76. 7%	
	磺胺甲恶唑	1 d		60. 8%	
		2 d		82. 1%	
pH 值	四环素	2	生物吸附	0	[23]
		8		49%	
光照	头孢拉定	5 500 Lux	生物降解	60. 89%	[24]
		2 500 Lux	生物降解	30%	
	阿莫西林	8 500 Lux	光解	37. 08%	
		2 500 Lux	光解	18. 5%	

3 微藻在 ARGs 去除中的应用

抗生素的滥用导致抗生素在纳克每升至毫克每升的质量浓度下残留在环境中,并对环境中的微生物形成持续的选择压力,诱导细菌产生耐药性,促进 ARB 和 ARGs 的大量增殖,给人类健康带来潜在的威胁。而微藻在去除抗生素的同时对 ARGs 的去除也有显著效果。Cheng 等^[26]研究发现,嗜硫原始红藻废水处理系统的出水与传统污泥处理系统相比, *twtS* 和 *bla_{TEM}* 的相对丰度均下降约 50%, *qnrA* 和 *ermB* 等基因的相对丰度都有不同程度的下降。同时嗜硫原始红藻反应器中噬菌体中 *qnrS*、*sul1* 和

Int11 的相对丰度也显著低于污泥反应器。另外, Cheng 等^[27]研究表明,抗生素废水经传统污泥系统处理后明显产生了 37 种新的 ARGs 亚型,有 24 种 ARGs 亚型存活,而在嗜硫原始红藻废水处理系统中只产生了 1 个新的亚型,并且仅有 4 种 ARGs 亚型存活。除了微藻系统,菌藻共生系统与传统污泥处理系统相比,去除 ARGs 能力也大幅提升。Liu 等^[28]研究发现,好氧颗粒污泥系统和菌藻共生好氧颗粒污泥系统中检测到 ARG 的种类数量分别为 45~53 和 44~47,加入链霉素和阿奇霉素后,好氧颗粒污泥系统中 ARGs 相对丰度分别为 1. 17 和 2. 69,

而菌藻共生好氧颗粒污泥系统的相对丰度分别为 0.653 和 0.964,因此,与好氧颗粒污泥相比,菌藻共生好氧颗粒污泥系统中 ARGs 相对丰度明显降低。

目前,微藻对 ARGs 的去除机制仍不明确,主要涉及 3 个过程(图 2)。(1)微藻细胞对移动基因元件的吸收内吞作用。移动基因元件(可传播的质粒和整合子)通过积累 ARGs 在水环境中的持续和传播发挥重要作用。因此,ARGs 的减少可以通过去除含有 ARGs 的移动基因元件而实现。微藻细胞可以吸收并内吞携带 *sul1* 的外源质粒,而微藻细胞可以吸收并内吞携带 ARGs 的外源质粒及其他移动元件,从而达到去除 ARGs 的目的^[29]。(2)微藻细胞分泌的 EPS 对质粒的吸附作用。EPS 能够促进含有 ARGs 质粒在微藻细胞表面吸附,从而加速微藻细胞对质粒的吸收内吞作用实现 ARGs 的去除。(3)微藻细胞产生活性氧自由基(ROS)猝灭剂过程。ROS 可以促进 ARGs 的传播^[30],而微藻可以产生 ROS 猝灭剂,包括抗氧化酶和光合色素。Ren 等^[31]研究表明,藻类产生的类胡萝卜素可以猝灭抗生素产生的 ROS,进一步阻断了 ARGs 的传播途径,促进了 ARGs 的去除。因此,微藻的加入可以实现 ARGs 的去除,但具体的去除机制仍需进一步研究。

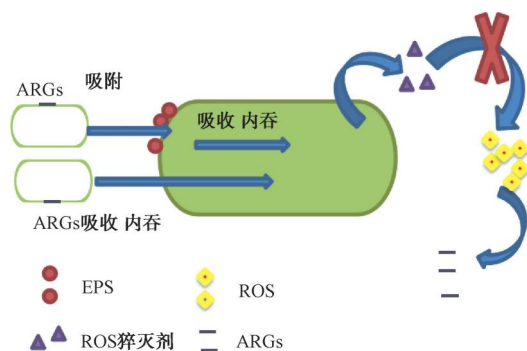


图 2 微藻系统中 ARGs 的去除机制

Fig. 2 Mechanism of ARGs Removal in Microalgae Systems

4 结论

本文总结了微藻去除抗生素的主要机理,阐述了抗生素去除效率的影响因素,介绍了藻类对 ARGs 的去除效果。然而微藻对抗生素及 ARGs 的去除过程复杂,出水中仍含有较高浓度的 ARGs,危害人类身体健康和生态平衡。因此,实现抗生素及 ARGs 的有效去除依然存在挑战。基于以上问题,今后的研究应集中在以下几个方面。

(1)探讨了藻类对抗生素的去除路径,明确了

抗生素降解过程中的中间产物以及降解产物,总结了抗生素去除过程中相关功能基因,阐明了抗生素去除机理。

(2)探讨了微藻细胞分泌的非酶类抗氧化物质对 ROS 的猝灭机制,明确了非酶类物质在 ARGs 去除中的具体作用,阐明了藻类对 ARGs 的去除机理。

(3)应开发藻类与高级氧化法的组合工艺,在抗生素高效去除的基础上,通过与高级氧化技术的结合,进一步促进 ARGs 的去除。

参考文献

- [1] LI S, ZHANG C, LI F, et al. Technologies towards antibiotic resistance genes (ARGs) removal from aquatic environment: A critical review[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 411: 125148. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.125148.
- [2] WU S, ZHANG J, XIA A, et al. Microalgae cultivation for antibiotic oxytetracycline wastewater treatment [J]. Environmental Research, 2022, 214: 113850. DOI: 10.1016/j.envres.2022.113850.
- [3] 韩玉. 膜技术在微藻采收中的应用[J]. 净水技术, 2021, 40(5): 22-27, 130.
HAN Y. Application of membrane technology in microalgae harvesting[J]. Water Purification Technology, 2021, 40(5): 22-27, 130.
- [4] 项磊, 杨黎彬, 陈家斌, 等. 碳中和背景下微藻技术对 PPCPs 的污染控制[J]. 净水技术, 2021, 40(11): 6-15, 27.
XIANG L, YANG L B, CHEN J B, et al. Pollution control of PPCPs by microalgae technology in the context of carbon neutrality[J]. Water Purification Technology, 2021, 40(11): 6-15, 27.
- [5] 姜现静, 吕剑, 武君, 等. 三角褐指藻对环丙沙星的去除过程及影响因素[J]. 生态毒理学报, 2022, 17(4): 523-532.
JIANG X J, LÜ J, WU J, et al. Removal process of ciprofloxacin by *Phaeodactylum tricornutum* and its influencing factors [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2022, 17(4): 523-532.
- [6] 韦艳玲. 小球藻对典型氯霉素类及磺胺类抗生素的去除机制探究[D]. 天津: 天津大学, 2019.
WEI Y L. The removal mechanism of typical chloramphenicol and sulfa antibiotics by *Chlorella* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2019.
- [7] 杨俊. 淡水微藻对水中四环素的胁迫响应及去除机制研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2022.
YANG J. Stress response and removal mechanism of tetracycline from water by freshwater microalgae [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2022.

- [8] LENG L, WEI L, XIONG Q, et al. Use of microalgae based technology for the removal of antibiotics from wastewater: A review[J]. Chemosphere, 2020, 238: 124680. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.124680.
- [9] XIONG Q, HU L X, LIU Y S, et al. Microalgae-based technology for antibiotics removal: From mechanisms to application of innovational hybrid systems [J]. Environment International, 2021, 155: 106594. DOI: 10.1016/j.envint.2021.106594.
- [10] XIE P, CHEN C, ZHANG C, et al. Revealing the role of adsorption in ciprofloxacin and sulfadiazine elimination routes in microalgae[J]. Water Research, 2020, 172: 115475. DOI: 10.1016/j.watres.2020.115475.
- [11] HOM-DIAZ A, JAÉN-GIL A, RODRÍGUEZ-MOZAZ S, et al. Insights into removal of antibiotics by selected microalgae (*Chlamydomonas reinhardtii*, *Chlorella sorokiniana*, *Dunaliella tertiolecta* and *Pseudokirchneriella subcapitata*) [J]. Algal Research, 2022, 61: 102560. DOI: 10.1016/j.algal.2021.102560.
- [12] KIKI C, RASHID A, WANG Y, et al. Dissipation of antibiotics by microalgae: Kinetics, identification of transformation products and pathways[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 387: 121985. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.121985.
- [13] XIAO G, CHEN J, SHOW P L, et al. Evaluating the application of antibiotic treatment using algae-algae/activated sludge system [J]. Chemosphere, 2021, 282: 130966. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.130966.
- [14] GARCIA-RODRÍGUEZ A, MATAMOROS V, FONTÀS C, et al. The influence of light exposure, water quality and vegetation on the removal of sulfonamides and tetracyclines: A laboratory-scale study[J]. Chemosphere, 2013, 90(8): 2297–2302.
- [15] WANG X, DOU X, WU J, et al. Attenuation pathways of erythromycin and biochemical responses related to algal growth and lipid synthesis in a microalga-effluent system [J]. Environmental Research, 2021, 195: 110873. DOI: 10.1016/j.envres.2021.110873.
- [16] GUO W Q, ZHENG H S, LI S, et al. Removal of cephalosporin antibiotics 7-ACA from wastewater during the cultivation of lipid-accumulating microalgae [J]. Bioresource Technology, 2016, 221: 284–290. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.09.036.
- [17] CHEN S, ZHANG W, LI J, et al. Ecotoxicological effects of sulfonamides and fluoroquinolones and their removal by a green alga (*Chlorella vulgaris*) and a cyanobacterium (*Chrysochroma ovalisporum*) [J]. Environmental Pollution, 2020, 263: 114554. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.114554.
- [18] XIONG J Q, GOVINDWAR S, KURADE M B, et al. Toxicity of sulfamethazine and sulfamethoxazole and their removal by a green microalga, *Scenedesmus obliquus* [J]. Chemosphere, 2019, 218: 551–558. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.11.146.
- [19] CHENG J, YE Q, YANG Z, et al. Microstructure and antioxidative capacity of the microalgae mutant *Chlorella PY-ZU1* during Tilmicosin removal from wastewater under 15% CO₂ [J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, 324: 414–419. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2016.11.006.
- [20] LI S, SHOW P L, NGO H H, et al. Algae-mediated antibiotic wastewater treatment: A critical review [J]. Environmental Science and Ecotechnology, 2022, 9: 100145. DOI: 10.1016/j.es.2022.100145.
- [21] NORVILL Z N, TOLEDO-CERVANTES A, BLANCO S, et al. Photodegradation and sorption govern tetracycline removal during wastewater treatment in algal ponds[J]. Bioresource Technology, 2017, 232: 35–43. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.02.011.
- [22] PENG Y Y, GAO F, YANG H L, et al. Simultaneous removal of nutrient and sulfonamides from marine aquaculture wastewater by concentrated and attached cultivation of *Chlorella vulgaris* in an algal biofilm membrane photobioreactor (BF-MPBR) [J]. Science of the Total Environment, 2020, 725: 138524. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138524.
- [23] DANESHVAR E, ZARRINMEHR M J, HASHTJIN A M, et al. Versatile applications of freshwater and marine water microalgae in dairy wastewater treatment, lipid extraction and tetracycline biosorption[J]. Bioresource Technology, 2018, 268: 523–530. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.08.032.
- [24] DU Y, WANG J, LI H, et al. The dual function of the algal treatment: Antibiotic elimination combined with CO₂ fixation [J]. Chemosphere, 2018, 211: 192–201. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.07.163.
- [25] XIONG J Q, KURADE M B, JEON B H. Ecotoxicological effects of enrofloxacin and its removal by monoculture of microalgal species and their consortium [J]. Environmental Pollution, 2017, 226: 486–493. DOI: 10.1016/j.envpol.2017.04.044.
- [26] CHENG X, DELANKA-PEDIGE H M K, MUNASINGHE-ARACHCHIGE S P, et al. Removal of antibiotic resistance genes in an algal-based wastewater treatment system employing *Galdieria sulphuraria*: A comparative study [J]. Science of the Total Environment, 2020, 711: 134435. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134435.
- [27] CHENG X, XU J, SMITH G, et al. Metagenomic profiling of antibiotic resistance and virulence removal: Activated sludge vs. algal wastewater treatment system [J]. Journal of Environmental Management, 2021, 295: 113129. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113129.
- [28] LIU L, YU X, WU D, et al. Antibiotic resistance gene profile in aerobic granular reactor under antibiotic stress: Can eukaryotic microalgae act as inhibiting factor? [J]. Environmental Pollution, 2022, 304: 119221. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.119221.

(下转第45页)

- 2017, 37(5): 20–25, 49.
- [53] KIM K, KIM K S, CHOI M, et al. Treatment of ion exchange resins used in nuclear power plants by super-and sub-critical water oxidation: A road to commercial plant from bench-scale facility [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, 189/190: 213–221. DOI: 10.1016/j.cej.2012.02.060.
- [54] QIN Q, WANG S, PENG H H, et al. Solubility of radioactive inorganic salt in supercritical water [J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2018, 317(2): 947–957.
- [55] 秦强, 夏晓彬, 李世斌, 等. 超临界水氧化技术及其在放射性废物处理的应用[J]. *工业水处理*, 2022, 42(9): 38–45.
- QIN Q, XIA X B, LI S B, et al. Supercritical water oxidation technology and its application in radioactive waste treatment[J]. *Industrial Water Treatment*, 2022, 42(9): 38–45.
- [56] 张瑞, 赵霞, 李庆维, 等. 电化学水处理技术的研究及应用进展[J]. *水处理技术*, 2019, 45(4): 11–16.
- ZHANG R, ZHAO X, LI Q W, et al. Research and application progress of electrochemical technology in wastewater treatment [J]. *Technology of Water Treatment*, 2019, 45(4): 11–16.
- [57] 赵丹获, 何亚鹏, 翟重渊, 等. 电催化氧化技术降解水中抗生素类污染物研究进展 [J]. *环境化学*, 2023, 42(12): 4104–4116.
- ZHAO D D, HE Y P, ZHAI C Y, et al. Recent developments of electrochemical oxidation in degradation of emerging antibiotic pollutants [J]. *Environmental Chemistry*, 2023, 42(12): 4104–4116.
- [58] 李宁. 溶解性有机质对羟基自由基氧化降解有机污染物的影响[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- LI N. Effect of dissolved organic matter on hydroxyl radical-induced oxidation of organic pollutants [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
- [59] WONG S, NGADI N, INUWA M I, et al. Recent advances in applications of activated carbon from biowaste for wastewater treatment: A short review [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 175: 361–375. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.12.059.
- [60] OUYANG J B, ZHOU L M, LIU Z R, et al. Biomass-derived activated carbons for the removal of pharmaceutical micropollutants from wastewater: A review [J]. *Separation and Purification Technology*, 2020, 253: 117536. DOI: 10.1016/j.seppur.2020.117536.
- [61] 巴能军, 周志伟, 董俊, 等. 助滤和再生粉末活性炭吸附技术用于工业废水深度处理 [J]. *给水排水*, 2017, 43(2): 71–74.
- BA N J, ZHOU Z W, DONG J, et al. Assisted filtration and regenerated activated carbon adsorption technology are used for advanced treatment of industrial wastewater [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2017, 43(2): 71–74.
- [62] 吴斯文, 吴瑜红, 陆中华, 等. 开发区工业污水处理厂提标改造工程设计 [J]. *给水排水*, 2017, 43(9): 48–51.
- WU S W, WU Y H, LU Z H, et al. Process selection and design for upgradation of an industrial wastewater treatment plant in a development zone [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2017, 43(9): 48–51.
- [63] 陈富强, 池勇志, 田秉晖, 等. 高盐工业废水零排放技术研究进展 [J]. *工业水处理*, 2018, 38(8): 1–5, 27.
- CHEN F Q, CHI Y Z, TIAN B H, et al. Research progress in the zero discharge technology for high-salt industrial wastewater [J]. *Industrial Water Treatment*, 2018, 38(8): 1–5, 27.
- [64] 李大海, 张星星, 陈甘, 等. 预处理+多级膜浓缩+蒸发结晶+膜电解组合工艺在造纸废水零排放工程上的应用 [J]. *环境工程*, 2021, 39(7): 185–191.
- LI D H, ZHANG X X, CHEN G, et al. Application of pretreatment-multistage membrane concentration + evaporative crystallization-membrane electrolysis combined process in a zero discharge project of papermaking wastewater [J]. *Environmental Engineering*, 2021, 39(7): 185–191.

(上接第 33 页)

- [29] AMARO H M, SOUSA J F, SALGADO E M, et al. Microalgal systems, a green solution for wastewater conventional pollutants removal, disinfection, and reduction of antibiotic resistance genes prevalence? [J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(7): 4266. DOI: 10.3390/app13074266.
- [30] BRYNILDSEN M P, WINKLER J A, SPINA C S, et al. Potentiating antibacterial activity by predictably enhancing endogenous microbial ROS production [J]. *Nature Biotechnology*, 2013, 31(2): 160–165.
- [31] REN C Y, XU Q J, MATHIEU J, et al. A carotenoid-and nuclease-producing bacterium can mitigate enterococcus faecalis transformation by antibiotic resistance genes [J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(21): 15167–15178.