

尹萌萌, 刘家琛, 许思思. 膜曝气生物膜反应器在养殖废水处理中的应用进展[J]. 净水技术, 2025, 44(12): 9-21.

YIN M M, LIU J C, XU S S. Application progress of membrane-aerated biofilm reactor in aquaculture wastewater treatment [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(12): 9-21.

膜曝气生物膜反应器在养殖废水处理中的应用进展

尹萌萌^{1,2,*}, 刘家琛¹, 许思思³

(1. 山东建筑大学市政与环境工程学院, 山东济南 250101; 2. 山东建筑大学黄河流域生态保护与城乡高质量发展研究中心, 山东济南 250101; 3. 山东建筑大学资源与环境创新研究院, 山东济南 250101)

摘要 【目的】 养殖废水具有氨氮和有机污染物浓度高、含有抗生素等特点, 需要对其进行处理, 以减少对受纳水体的污染。膜曝气生物膜反应器(MABR)是一种将曝气膜与生物膜相结合, 可以实现无泡曝气、同步脱氮除碳的新型生物反应系统, 在养殖废水处理中具有应用潜力。【方法】 本文通过研究单级/多级MABR、或耦合工艺在常规污染物去除、温室气体一氧化二氮减排、抗生素降解等方面的功效; 利用电子转移、基因表达等方法, 解析了MABR运行机理、氮元素迁移路径、微生物代谢降解等机制, 并概括归纳了抗生素对MABR脱氮性能的影响。【结果】 通过分析, 本文对优化的工艺参数和关键的影响因素进行总结, 为MABR高效运行提供理论支撑。由于抗生素对水体和MABR运行具有双重影响, 本文从生物膜屏障保护和抗性基因调控两方面, 归纳MABR应对抗生素冲击的响应机制, 为深入解析抗生素降解提供理论依据。【结论】 MABR在养殖废水处理方面的后续研究, 可关注曝气膜的性能优化、耦合工艺的协同强化处理机制、微生物菌群应对抗性基因的调控手段等。

关键词 膜曝气生物膜反应器 养殖废水 抗生素 脱氮性能 降解机制

中图分类号: X703 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)12-0009-13

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.12.002

Application Progress of Membrane-Aerated Biofilm Reactor in Aquaculture Wastewater Treatment

YIN Mengmeng^{1,2,*}, LIU Jiachen¹, XU Sisi³

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China;

2. Research Center for Ecological Protection and Urban-Rural High-Quality Development of the Yellow River Basin, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China;

3. Institute of Resources and Environmental Innovation, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

Abstract 【Objective】 Aquaculture wastewater is characterized by high concentrations of ammonia nitrogen and organic pollutants, as well as the presence of antibiotics. It requires treatment to mitigate pollution to receiving water bodies. The membrane-aerated biofilm reactor (MABR) is a novel biological reaction system that integrates aeration membranes with biofilms. It enables bubble-free aeration and simultaneous nitrogen and carbon removal, thus exhibiting significant application potential in aquaculture wastewater treatment. 【Methods】 This paper reviews the performance of single-stage/multi-stage MABR systems and their coupled processes in conventional pollutant removal, nitrous oxide emission reduction, and antibiotic degradation. Mechanisms including MABR operational principles, nitrogen migration pathways, and microbial metabolic degradation were analyzed using method such as electron transfer analysis and gene expression detection. Additionally, the effects of antibiotics on the nitrogen removal performance of MABRs were summarized and generalized. 【Results】 Through the analysis, this paper summarizes the optimized process parameters and key influencing factors, providing theoretical support for the efficient operation of MABR. Given the dual impacts of antibiotics on aquatic environments and MABR operation, the response mechanisms of MABR to antibiotic shock were summarized in two aspects: biofilm barrier protection and antibiotic resistance gene regulation. These findings offer a theoretical basis for in-depth exploration of antibiotic

[收稿日期] 2025-06-11

[基金项目] 山东建筑大学博士基金(X21078Z); 山东省本科教学改革重点项目(Z2022071)

[通信作者] 尹萌萌(1979—), 女, 研究方向为废水处理技术, E-mail: ymm123@sdjzu.edu.cn。

degradation mechanisms. [Conclusion] For future research on MABR application in aquaculture wastewater treatment, focus should be placed on the performance optimization of aeration membranes, the synergistic enhancement mechanisms of coupled processes, and the regulatory strategies of microbial communities in response to antibiotic resistance genes.

Keywords membrane-aerated biofilm reactor (MABR) aquaculture wastewater antibiotics denitrification performance degradation mechanism

随着养殖业的快速发展,未经妥当处理的饲料残渣和动物排泄物会通过多种渠道污染地下水和周

围水环境^[1](图1)。污染物的存在,不仅会导致水体富营养化、水质恶化,甚至还会威胁人类健康。

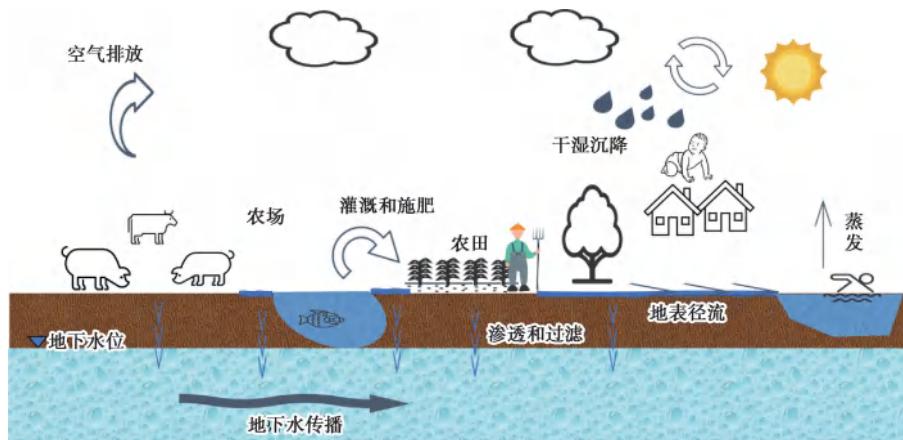


图1 养殖场污染物迁移途径

Fig. 1 Migration Pathways of Pollutants Discharged from the Livestock Farms

1 养殖废水和处理技术特点

1.1 养殖废水特点

养殖废水主要包括畜禽养殖废水和水产养殖废水,以动物粪便、尿液、饲料残渣和冲洗水为主。其不仅含有高浓度的有机物、氨氮、悬浮物(SS)等,还包括残存在饲料中的抗生素和重金属等^[2-5]。在畜禽养殖废水中,检测到的磺胺类(SA)和四环素类(TC)抗生素的浓度,可达数百纳克每升;而磺胺间

甲氧嘧啶(SMM)的质量浓度甚至超过微克每升水平。水产养殖废水中抗生素的质量浓度通常维持在纳克每升范围内^[6]。饲料中抗生素的添加,增加了其在养殖废水中的残留率,导致抗生素抗性细菌(ARB)的增殖和抗生素抗性基因(ARGS)的产生。因此,养殖废水的处理问题正逐渐成为学术研究和工业实践领域共同关注的焦点^[7]。养殖废水具体组成如表1所示。

表1 不同养殖环境下养殖废水的成分组成
Tab. 1 Composition of Aquaculture Wastewater under Different Breeding Environments

废水类型	化学需氧量 (COD)/ (mg·L ⁻¹)	氨氮/ (mg·L ⁻¹)	硝酸盐氮 (NO ₃ ⁻ -N)/(mg·L ⁻¹)	亚硝酸盐氮 (NO ₂ ⁻ -N)/(mg·L ⁻¹)	总氮(TN)/ (mg·L ⁻¹)	总磷(TP)/ (mg·L ⁻¹)	参考文献
畜禽养殖废水	3 969	1 650			1 700	171	[8]
	4 300±200	740±20			800±20		[9]
	918~1 050	41.6~60.4			57.4~78.2	16.3~20.4	[10]
水产养殖废水	163.8±1.3	4.7±0.47	4.9±0.47	0.6±0.08			[11]
	120.0	4.9	5.1	0.7			[12]
	94.7±14.4	1.4±0.4	1.4±0.4	0.1±0.2	11.3±0.6	4.4±0.2	[13]
	63.12±1.32	3.14±0.13	7.08±0.11	0.50±0.01			[14]

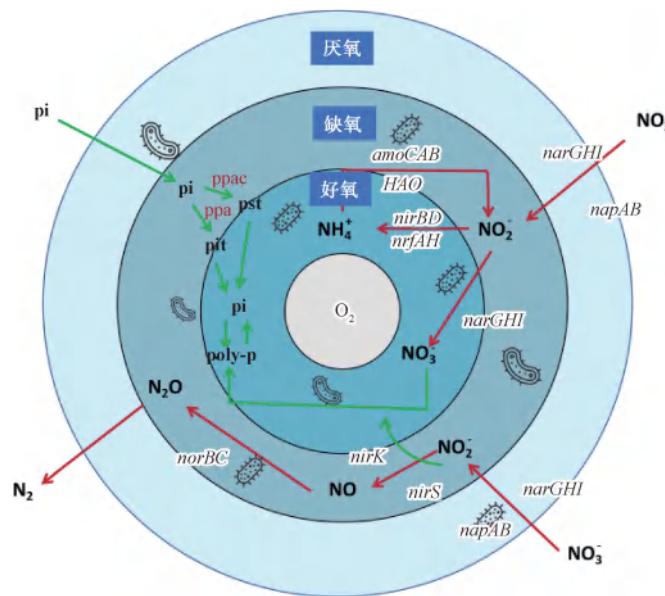
1.2 养殖废水处理技术

养殖废水处理包括物理、化学、生物等方法。传统物理方法,例如过滤、吸附等,主要基于污染物的物理特性(如粒径、密度差异)实现分离,无法完全去除溶解性污染物。化学法包括沉淀、氧化还原、电化学作用等方法,可针对性去除磷、重金属及难降解有机物(如抗生素),具有反应速率快、靶向性强的特点,能高效去除牲畜、家禽和水产养殖废水中的污染物^[15],但存在高能耗、可能引发二次污染及可回收资源损耗等不足。养殖废水中的碳、氮和磷是微生物生长代谢的主要营养基质,生物法主要依托微生物的代谢作用实现污染物的转化与降解。随着政府间气候变化专门委员会和各国对碳中和目标的承诺,国际上愈发重视处理与处置废物的环境可持续性^[16-17]。生物法,特别是生物膜技术,因其成本低、无二次污染、对环境友

好等特点,具有处理优势。在此背景下,膜曝气生物膜反应器(MABR)作为一种新型生物膜技术,受到人们的关注。

1.3 MABR 的结构特点与工作原理

MABR 是一种将曝气膜与生物膜相结合,能有效替代传统生物膜反应器的新型生物膜反应系统。MABR 具有异相传质的特点,如图 2^[18] 和图 3^[19] 所示。氧气和有机物以逆向扩散的方式被输送到生物膜中,氧气浓度在曝气膜表面最高,并随着生物膜的厚度增加而降低,在生物膜和废水的交界处含氧量较低,由内到外形成好氧区、缺氧区、厌氧区,如图 3(a)所示。不同于传统的生物膜,MABR 是通过氧气与有机物异向传质进行生物降解,如图 3(b)所示。该结构有利于多种功能性菌种共生,可为生物脱氮(如同步硝化反硝化和短程硝化-厌氧氨氧化)提供有利环境。



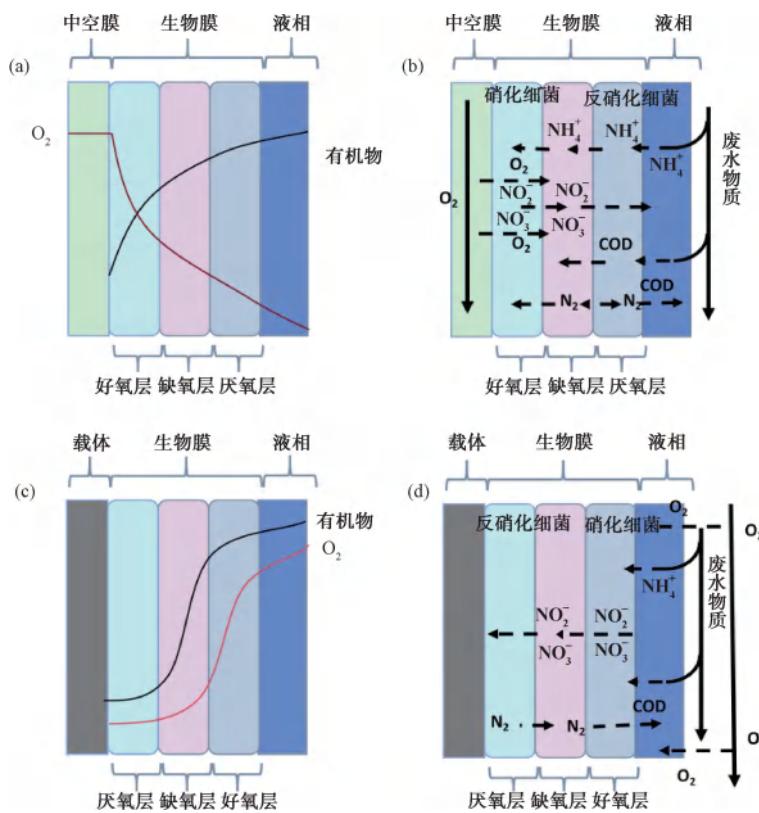
注:pi—无机磷酸盐; poly-p—多聚磷酸盐; ppa—无机焦磷酸酶; ppac—多聚磷酸盐合成相关蛋白; pst—磷酸盐特异性质转运; pit—无机磷酸盐转运; norBC—一氧化氮还原酶; HAO—羟胺氧化还原酶; amoCAB—氨单加氧酶; napAB—周质硝酸盐还原酶; narGHI—膜结合硝酸盐还原酶; nirK—铜型亚硝酸盐还原酶; nirS—血红素 cd1 型亚硝酸盐还原酶; nirBD—NADH 依赖型亚硝酸盐还原酶; nrfAH—细胞色素 c 型亚硝酸盐还原酶。

图 2 MABR 分层结构上的污染物迁移路径^[18]

Fig. 2 Pollutants Migration Path on the Stratified Structure of MABR^[18]

相比传统生物法,MABR 具有耐冲击力强的特点。其主要体现在其特殊的膜分层结构,如图 3^[19] 所示,使得生物膜上的生物链丰富多样,菌群能够分泌丰富的胞外聚合物(EPS),在面对高毒性有机污染物时,具有传统生物法无法比拟的抗毒性、抗负荷

冲击以及强降解能力。MABR 特殊的结构不仅能降低 COD 和氮污染物浓度,还能实现同步硝化反硝化^[20]。在理论上,MABR 的无泡曝气方式,可以实现 100% 的氧气转移效率(OTE),减少与传统曝气方法相关的能量损失(通常占运营成本的 40%~

图 3 (a,b) MABR 工作原理和(c,d)传统生物膜工作原理对比^[19]Fig. 3 (a, b) Comparison of Working Principles of MABR and (c, d) Traditional Biofilm^[19]

60%), 实现节能运行。并且该方式能降低挥发性有机物的挥发, 减少二次污染^[21]。综上所述, 针对养殖废水高氨氮、高有机污染以及存在抗生素的特点, MABR 可在脱氮除碳、抵抗抗生素等有机物冲击性方面, 具有优势。

2 MABR 对养殖废水中污染物去除效果的研究

涵盖水产和畜禽养殖在内的农业活动是 COD 的最大来源, 也是氨氮的第二大来源。2022 年全国农业源 COD、氨氮、TN 排放量分别占全国排放量的 68.8%、34.2%、55.0%。据统计, 农业源数据主要来源于畜禽养殖业和水产养殖业^[22]。因此, COD、氨氮、TN 为养殖废水中的主要污染物, 亟需处理消解。

2.1 MABR 对常规污染物去除效果的研究

MABR 可以在养殖废水中单独使用, 并且具有较好的处理效果。Gong 等^[23]在利用 MABR 处理堆肥牲畜排泄物废水时发现, 氨氮去除率达 93.06% 以上, COD 去除率达 88.38% 以上。Terada 等^[24]采用 MABR 方法处理高氮水平 (TN 质量浓度为

4 000 mg/L) 的养猪废水, 实现了 96% 的 COD 和 83% 的 TN 去除效率。近几年, 不少研究针对优化 MABR 操作条件, 提高其处理效能。如贺梦莹等^[25]使用疏水性聚偏氟乙烯膜作为 MABR 系统的附着载体, 模拟养殖废水预处理后的生化处理阶段。通过优化曝气压力等条件, COD 和氨氮去除率分别为 76.2% 和 85.6%, 相比未优化条件分别提高了 41% 和 42%。孙浩翔等^[26]研究发现, 当 MABR 处理水产养殖废水时, 混合液碳氮比 (C/N) 为 5:1, 且曝气强度为 1.2 mL/min, 可较好实现同步硝化反硝化, 此时对氨氮和 TN 的平均去除率分别达 98.86% 和 55.21%, 且 TN 质量浓度稳定在 11 mg/L 以下。具体参数对比如表 2 所示。

在养殖废水处理领域, 由于污染物成分比较复杂, MABR 也可以与其他工艺协同运用, 或者多级串联, 强化处理效果, 降低处理成本。王宇等^[27]构建“MABR 强化型三池两坝”技术模式, TP、TN、氨氮、COD 去除率分别提升了 85.35%、13.09%、25.67%、14.44%, 从而降低了成本, 提高了产值。赵丽等^[28]运用厌氧迁移式污泥床反应器 (AMBR) 和 MABR

表 2 单级 MABR 处理养殖废水性能参数对比
Tab. 2 Comparison of Performance Parameters of Single-Stage MABR for Aquaculture Wastewater Treatment

废水类型	进水水质/(mg·L ⁻¹)	操作条件	处理效果	参考文献
牛粪厌氧发酵液	COD: 6 887. 53±133. 26 TN: 424. 93±24. 61 氨氮: 376. 94±18. 95 NO_2^- -N: 0. 13±0. 01 NO_3^- -N: 0. 006±0. 002	疏水性聚四氟乙烯膜 空气流量: 5 mL/min 曝气压: 5 kPa 水力停留时间(HRT): 24 h pH 值: 7. 03±0. 12	氨氮≥93. 06% COD≥88. 38% TN≥92. 56%	[23]
堆肥牲畜排泄物废水	氨氮: 3 000 COD: 4 500 TN: 4 000	聚乙烯膜 曝气压: 20 kPa 温度: (25±0. 3) °C HRT: 15 d pH 值: 7. 5	氨氮≥90% TN≥83% COD≥96%	[24]
模拟养殖废水	COD: 1 040 氨氮: 52	疏水性聚偏氟乙烯膜 曝气压: 25 kPa pH 值: 8. 5 HRT: 48 h	COD≥76. 2% 氨氮≥85. 6%	[25]
模拟水产养殖废水	COD: 75. 0~112. 5 氨氮: 76. 4	疏水性聚偏氟乙烯膜 C/N: 5: 1 空气流量: 1. 2 mL/min	氨氮≥98. 86% TN≥55. 21%	[26]

耦合工艺处理畜禽养殖废水,除了有效去除常规 COD、氨氮等污染物质外,还降低废水中的挥发性脂肪酸含量。

通过以上研究发现,MABR 可单独应用于常规污染物的去除,对养殖废水中的氨氮、COD、TN 保持较高的去除率。在去除污染物的同时,由于微生物的附着生长,使得生物膜结构发生变化,增强了其耐冲击能力,可以应对性质更加复杂的养殖废水。另外,通过膜材质的改良改性、曝气压和水力停留时间的改变等操作条件,均可提高 MABR 的处理效果。多级 MABR 串联或耦合工艺的联用,不仅扩大了其应用范围,且对常规污染物和目标污染物,有了更强的针对性处理效果。

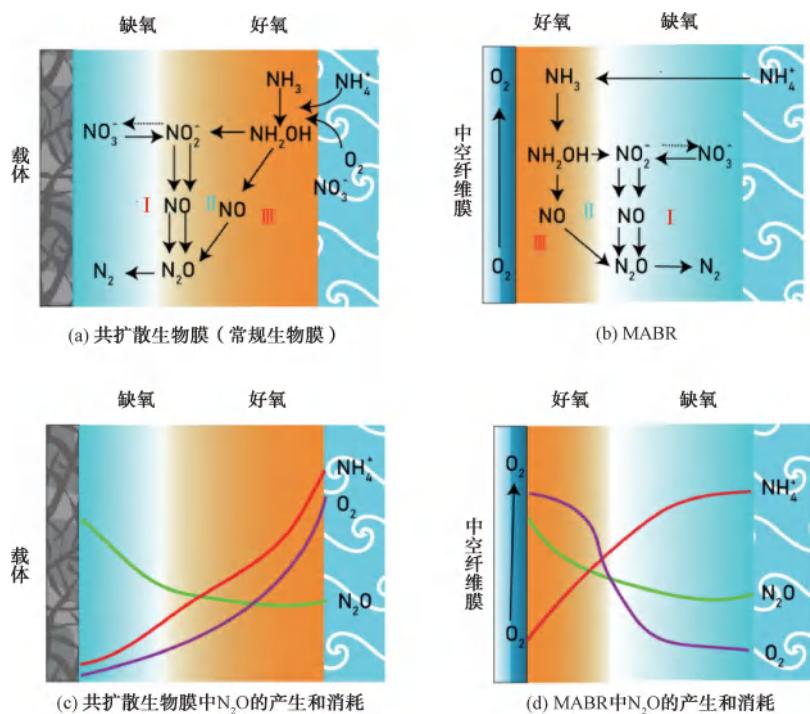
2.2 MABR 对副产物 N₂O 产生的影响

传统的生物膜处理法中,温室气体 N₂O 会随着氨氧化细菌的亚硝化和亚硝酸盐氧化细菌反硝化以及异养硝化细菌反硝化大量产生,进而影响大气环境^[29~30],如图 4^[31]所示。在 MABR 中,N₂O 产生和消耗的区域很近。研究^[32]发现,在 MABR 的缺氧/好氧层中,大量的有机碳可以降低异养硝化细菌通过反硝化途径产生 N₂O 的几率;同时,氨氧化细菌的硝化作用发生在好氧区,通过 NH₂OH 途径产生

的 N₂O 被缺氧区消耗,进而控制 N₂O 的产生。

研究^[31]证明,MABR 相较于传统的生物膜法,能够排放更少的 N₂O。试验发现,MABR 中 N₂O 的排放因子为 0. 005 8%±0. 000 5%,远低于传统生物膜的 N₂O 排放因子 0. 72%±0. 13%。还有研究^[32]表明,MABR 的间歇曝气和特殊的分层结构,在去除氮的同时,可最大限度地减少 N₂O 排放。He 等^[33]采用全长建模方法结合动态模拟,搭建新型 MABR 装置,可通过曝气压控制生物膜的分层结构。研究发现,在保证良好脱氮性能的同时,混合 MABR 工艺的 N₂O 排放量仅为传统活性污泥法的 1/5,但 CH₄ 排放量相对较高。宋舒兴等^[34]在研究中发现,进水的 C/N 对 MABR 的性能和气体排放有显著影响,并提出通过优化曝气,控制生物膜厚度和微生物群落结构,完善 MABR 的性能,减少温室气体排放。

由此可见,MABR 由于其无泡曝气的方式,以及曝气膜与生物膜分层的结构特点,使得产生的温室气体 N₂O 被硝化细菌消耗,减少了排放。但其厌氧区生物膜上甲烷菌的生长,导致 CH₄ 排放量相对较高。在后期的研究中,可以借助数学模型,基于人工智能建立动态监测,控制生物膜厚度和微生物群落结构,减少温室气体的排放。



注:(a)和(b)中 I 为反硝化异养反硝化细菌反硝化; II 为氨氧化细菌反硝化; III 为氨氧化细菌亚硝化。

图 4 不同生物膜中 N_2O 的产生途径^[31]

Fig. 4 N_2O Generation Pathways in Different Biofilms^[31]

3 抗生素对 MABR 脱氮性能的影响机理及降解机制分析

抗生素在养殖业中的广泛应用,导致废水中的含量较高^[35]。常用抗生素包括 SA、TC 和喹诺酮类。由于大多数抗生素是水溶性的,且动物对抗生素的吸收转化率较低,致使多达 30%~90% 的抗生素未被吸收,而是以母体化合物通过动物粪便或尿液排出^[36]。这些抗生素残留会通过饮用水和食物链进入人体,对人体健康构成严重威胁^[37]。此外,在土壤和污泥等环境中的抗生素残留还会加速环境中 ARB 和 ARGs 的发展,从而导致人类疾病防控风险的增加^[38]。

传统生物处理法对抗生素的降解去除效果不明显,且抗生素对其脱氮除磷具有抑制作用。研究^[39]发现,MABR 在去除微污染物方面,因其独特的无泡曝气技术,能显著降低微污染物和 ARGs 的溢出风险^[40]。并且,MABR 还可以利用生物膜优势菌群的不同和靶向性,降解不同的抗生素。

3.1 抗生素对脱氮性能的影响机理

毕晓敏等^[41]的研究中发现,抗生素诺氟沙星的存在,会抑制氨氧化细菌和亚硝酸盐氧化细菌的活

性,从而影响脱氮处理效果,表现为氨氮去除率从 96.4% 降至 35.6%, TN 去除率从 72.4% 降至 30.6%。还有研究^[42]发现,抗生素通过影响氮循环中关键酶的活性来影响氮的转换和去除。如抗生素可能与氨单加氧酶的活性位点结合,从而抑制氨单加氧酶的活性,导致抗生素代谢减慢,氨去除受阻。

研究^[43]发现,MABR 的脱氮性能受到抗生素浓度的影响,主要是因为生物的硝化反硝化过程,依赖于电子的供应。电子传递和能量代谢在 MABR 脱氮过程中,具有关键作用。通过电子传递过程的干涉或优化,可提高 MABR 在高浓度抗生素作用下的脱氮效果,如:烟酰胺腺嘌呤二核苷酸氢化物(NADH)和黄素腺嘌呤二核苷酸(还原型)(FADH₂)、电子转移与利用和能量支持^[44]。Lin 等^[45]的研究发现,四环素质量浓度升高至 800 $\mu\text{g}/\text{L}$ 以上时,会降低碳源代谢相关基因[如乙酰辅酶 A 合成酶基因(ACSS)]的相对丰度,这些基因的减少可能会抑制三羧酸循环中电子和三磷酸腺苷的产生,从而影响细胞的代谢过程,进而抑制硝化反硝化过程^[41]。如 Song 等^[42]构建活性炭负载纳米零价铁(nZVI-C)增强的 MABR 耦合部分亚硝化-厌氧氨

氧化工艺(PN/A)系统,nZVI-C作为一种导电材料,能够在生物膜中产生电子。这些电子可以被功能微生物利用,促进氮的转化过程。

Li 等^[46]在研究 MABR 处理含有高浓度土霉素的水产养殖废水时,利用 16S 核糖体脱氧核糖核酸(16S rDNA)测序技术分析生物膜中氮循环基因的数量变化。结果发现,在高浓度土霉素条件下,外层反硝化菌群的活动会受到土霉素的抑制,氨氮高效去除(98.2%),TN 去除率下降(76%)。

结合以上研究发现,抗生素通过影响硝化和反硝化间电子间的产生、转移和消耗,控制脱氮相关基因的丰度和表达,进而影响参与氮循环的微生物群落结构。抗生素对 MABR 脱氮性能的影响,可以通过以下几个方面分析。从微生物学角度,高浓度抗生素对于反硝化作用的影响大于硝化作用,可能源于 MABR 特殊的膜分层结构和抗生素外排泵功能的原因。通过抑制氨氧化细菌和亚硝酸盐氧化细菌的活性,氮循环中关键酶的活性,影响氮的转化。从电子迁移角度,抗生素的浓度会通过电子转移,影响细胞代谢,抑制硝化反硝化,影响脱氮性能。从基因角度,高浓度的抗生素会影响生物膜中氮循环基因的数量,抑制反硝化菌群的活动,导致硝酸盐还原基因(*narG*)转录水平下降,硝酸盐积累,NO₃⁻-N 升高,TN 去除率下降。促进氨氧化基因(*amoA/B*)和亚硝酸盐氧化基因(*nxrA*)转录水平,支撑高效氨氮去除。

在抗生素对 MABR 脱氮性能的影响机制中,电子迁移与氮循环基因并非孤立作用,而是通过能量供应-功能调控-代谢协同的层级关系互相影响。一方面,电子迁移为氮循环基因提供能量支撑。当抗生素抑制电子迁移时,细胞供能不足会优先限制耗能较高的基因转录。具体表现:*narG* 的表达会受抑;而耗能较低的 *amoA/B* 则可维持表达,进而维持相应功能。另一方面,氮循环基因产物反向调控电子分配。*amoA/B* 上调能促进电子生成,为 *nxrA* 提供充足电子供体,形成高效循环;而 *narG* 受限时,电子会出现积累,进而抑制上游传递效率,形成负向协同效应,最终导致脱氮受阻。最终,氮循环基因与电子迁移协同作用 MABR 生物膜群落结构。抗生素浓度差异促使电子迁移与基因表达呈现区域协同。厌氧区 *narG* 受抑时,微生物会上调 *amoA* 转向好氧氨氧化;好氧区则通过 *nxrA* 高表达维持电子传递,从而实现氨氮与 TN 去除的差异化表现。

由此可知,微生物的适应性在 MABR 系统应对抗生素胁迫中起着关键作用。某些微生物可通过自身的代谢和基因变化,逐渐适应抗生素的存在,从一定程度上缓解抗生素对 MABR 脱氮性能的影响。因此,培养和筛选具有抗生素耐受性的微生物菌株,对于提高 MABR 系统的稳定性和脱氮效率具有重要意义。

3.2 抗生素在 MABR 中的降解机制

MABR 对于抗生素的作用机制主要是吸附-生物降解协同作用。MABR 中的 EPS 首先吸附抗生素,然后在微生物作用下发生降解,转化为低毒或者无毒的产物。Li 等^[46]研究了 TC 在 MABR 系统中的降解效能,可实现 TC 的高效去除(77.6% ~ 84.8%)。研究发现,在吸附-生物降解协同作用下,TC 先被 EPS 吸附,然后嗜甲基菌(*Methylophilus*)、根瘤菌(*Rhizobium*)、噬氢菌(*Hydrogenophaga*)和枝杆菌(*Ramlibacter*)对 TC 完成脱甲基、芳环裂解作用。最终降解为 17 种低毒中间产物,证明了 MABR 可以在破坏 TC 化学结构的同时,实现对 TC 的生物转化。Taşkan 等^[47]也验证了在 MABR 中,TC 在吸附-生物降解协同作用下,可被降解为毒性较低的产物,表明 MABR 能够有效地将 TC 转化为更安全的物质。

Aydin 等^[48]利用 MABR 中处理金霉素,在 HRT 为 18 h,O₂ 压强为 41.54 kPa 时,金霉素去除通量达到最高值 2.0 mg/(m²·d),MABR 中的生物膜能够吸附金霉素,为后续的氧化降解提供了条件。其中生物膜中的微生物是金霉素氧化降解的关键。研究发现,β-变形菌门(β-Proteobacteria)是主要的细菌门类,其中某类微生物能够利用 O₂ 作为电子受体,将金霉素分子中的 C=C、氨基等活性基团进行氧化,从而破坏金霉素的化学结构,使其转化为毒性较低的产物。

Li 等^[49]在研究中发现,MABR 处理含磺胺甲恶唑废水时,系统对磺胺甲恶唑的去除率达到 92.3%,并生成 17 种毒性较低的代谢产物。主要通过生物膜中硫酸盐还原菌、根瘤菌和金黄杆菌等多种微生物协同作用,在厌氧区使磺胺甲恶唑开环,使得苯胺羟基化和磺酰基中 S—N 键断裂。

Xia 等^[50]研究发现,MABR 在处理含磺胺甲恶唑废水时,除生物吸附和生物降解作用外,磺胺甲恶唑降解相关的多功能生物催化剂(如细胞色素

P450)相对丰度较高,这表明细胞色素P450介导的微生物代谢可能是MABR中磺胺甲恶唑的主要去除途径之一。

由此可见,MABR对抗生素的降解主要是吸附-生物降解协同作用。以微生物代谢主导的多重作用是其核心,其中包括好氧/兼性菌的直接分解、厌氧/缺氧区的间接转化,以及菌群与微生物的协同作用等过程。MABR具有一定的吸附能力,吸附态抗生素被膜表面附着的微生物逐步吸附降解,避免其直接释放至水体。MABR对于抗生素的降解过程受多种外界环境因素的显著影响,如温度、溶解氧、pH等。未来,针对养殖废水中的抗生素问题,可以在关键菌群和微生物群落结构的优化方面继续深入研究,通过破坏抗生素的C=C和氨基等活性基团,降解其为低毒或无毒产物。同时进一步研究吸附与生物降解之间的协同关系以及运行参数的优化,以改善MABR技术在处理含抗生素废水方面的性能和处理效果。

4 MABR对抗生素冲击响应机制的研究

依据前面的研究分析可知,抗生素可以影响MABR的脱氮性能,反之,MABR对抗生素也有一定的降解作用。在MABR面对高浓度抗生素冲击时,由于其特殊的结构,存在一定程度的响应。响应机制主要体现在EPS的保护、ARGs转移,以及微生物的协同作用。其中,与前两者相关的分层生物膜的物理保护作用与抗生素外排泵功能,是MABR应对高浓度抗生素冲击的关键。

4.1 生物膜屏障保护机制

MABR通过其特殊分层结构使内层的氨氧化细菌和亚硝酸盐氧化细菌免受高浓度抗生素的直接毒性^[44];同时在高浓度抗生素作用下^[45],外层的耐药微生物促进外层生物膜分泌EPS。EPS不仅可以通过其网状结构阻止抗生素进入细胞;还能通过吸附结合作用,使部分抗生素被固定在EPS中,降低了周围环境中抗生素浓度,避免抗生素对于细胞的直接毒害作用,同时还可以降低ARGs的诱导表达水平^[51]。Li等^[46]在研究中发现,EPS含量随着磺胺甲恶唑浓度增加呈现上升趋势,刺激EPS的分泌有助于减少磺胺甲恶唑对细胞生长、活动和存活的抑制作用,并能减少磺胺甲恶唑进入细胞浓度。这可能是由于胞外蛋白质(PN)中的官能团和磺胺甲恶

唑之间形成氢键^[52],使得部分磺胺甲恶唑被吸附在PN上。另外,PN、蛋白质和多糖(PS)比值(PN/PS)的增加可提供更多的吸附位点,从而减轻磺胺甲恶唑带来的负面影响。在Song等^[42]的研究中发现,添加nZVI-C能显著增加MABR中EPS的PN含量和PN/PS,有利于微生物在生物膜中截留相应的抗生素,并有效促进关键农药降解菌在生物膜中的聚集。

4.2 ARGs 调控机制

微生物在面对抗生素胁迫时,ARGs的抗性机制是一种最主要的保护策略^[53]。其抗性机制方式主要如图5^[53]所示。外排泵介导的抗生素外排机制是MABR系统控制ARGs的核心机制之一;外排泵是负责转运多种毒性化合物的跨膜蛋白质^[53]。在Li等^[49]的研究中发现,外排泵的相关基因丰度随着磺胺甲恶唑的加入而增加。Lin等^[45]在研究中也发现,在抗生素土霉素胁迫下,外排泵相关基因相对丰度也呈上升趋势,生物膜外层的相关基因的丰度大于其内层,这可能是因为外层生物群落处于更高浓度的土霉素中,相关外排基因的增加能够减轻抗生素的损伤。张吉盈^[54]在研究中发现,MABR中生物膜的ARGs丰度会随着工况条件和抗生素浓度的变化而发生动态变化。这说明MABR中的微生物能通过调节自身ARGs的表达来适应不同环境压力的胁迫。

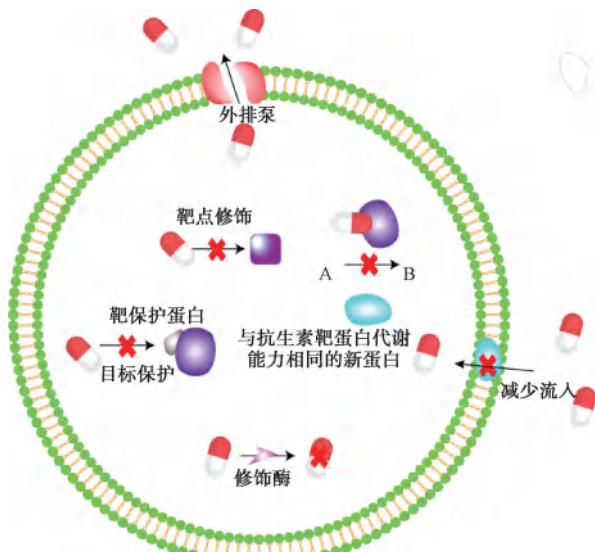


图5 抗生素耐药的分子机制概述^[53]

Fig. 5 Overview of Molecular Mechanism of Antibiotics Resistance^[53]

结合以上研究发现, MABR 在处理抗生素废水时, 其生物膜上的微生物可通过多种方式, 回应抗生素的胁迫, 表现出一定的保护作用。该保护机制使得微生物能够在抗生素存在的情况下继续生长和代谢, 保证了处理效果的稳定性。MABR 中的生物膜分泌的 EPS 能够形成一个物理屏障, 减少抗生素与微生物细胞的直接接触, 从而降低抗生素对微生物的胁迫, 抑制 ARGs 的产生和传播。同时, 微生物在抗生素胁迫下通过 ARGs(如外排泵)等抗性机制保护自身, 外排泵主动将抗生素泵出细胞外, 降低细胞内抗生素浓度, 减少 ARGs 的诱导表达和水平转移, 响应环境压力变化。

5 MABR 耦合工艺协同去除抗生素的研究

在实际应用中, MABR 面临着诸多挑战。当长期处于抗生素污染环境时, MABR 的运行效果会受到不同程度的影响。其中, ARB 和 ARGs 的产生, 不仅削弱了 MABR 的处理效能, 还可能对生态环境和人类健康构成潜在威胁, 成为亟待攻克的难题。

学者^[55]利用电化学-生物协同降解水中磺胺甲恶唑和甲氧苄啶, 如图 9 所示。外加电场先通过电解水产生羟基自由基($\cdot\text{OH}$), 作用氧化磺胺甲恶唑和甲氧苄啶, 裂解其结构式。MABR 中的生物膜再进一步代谢电化学产生的中间产物, 进而实现污染物降解, 实现了约 60% 的磺胺甲恶唑和甲氧苄啶去除率。在降解过程中, 外加电场降低了生物膜内细菌的代谢活性, 抑制 *sul1*、*sul2* 等 ARGs 的横向转移和表达, 将 ARGs 相对丰度降低至 0.23, 而传统 MABR 为 0.56。

Zhang 等^[56]采用模拟太阳光辅助 MABR 工艺对磺胺甲恶唑进行去除, 并降低 ARGs 的产生。通过光解-生物降解协同作用, 对磺胺甲恶唑的去除率达到 92.75%。直接光解主导了磺胺甲恶唑的降解, 贡献了 64.61% 的去除率, 光解灭活了部分功能细菌, 但不影响整体处理效果。同时模拟阳光通过破坏细菌细胞膜和 DNA, 减少携带 ARGs 的功能菌, 如微杆菌属 BR1 菌株(*Microbacterium* sp. BR1), 使太阳光辅助 MABR 出水及生物膜中 ARGs (*sul1*/*sul2*) 丰度较 MABR 降低 1~3 个数量级。

综上所述, MABR 耦合工艺协同机制主要通过传质增强、界面反应、微生物-物化联动等实现。对于抑制 MABR 生物膜 ARGs 的研究, 主要集中

在耦合高级氧化工艺上, 如光解、电化学等。这些方法可通过界面反应、电子转移生成活性氧物质(如 $\cdot\text{OH}$), 破坏细菌的细胞膜、减少胞内 ARGs 向环境释放。同时, 利用功能菌群参与调控, 可抑制携带 ARGs 的宿主菌富集或繁衍, 实现 ARGs 阻控。

6 总结和展望

结合以上研究发现, 养殖废水的常规污染物, 如 COD、氨氮和 TN 浓度高于市政污水, 但在 MABR 中的去除效率可达到 70%~80%。养殖废水中的难降解有机物抗生素, 譬如 TC 和磺胺甲恶唑, 在 MABR 中的去除率也可以达到 50%~92%。MABR 去除抗生素的效果, 主要归因于生物膜上丰富的微生物群落, 实现协同代谢降解抗生素。同时, MABR 的分层生物膜结构, 对外层污染物具有阻挡作用, 对内部功能菌群具有保护作用。这种分层结构, 不仅可以吸附一定浓度的抗生素, 还为后续的微生物分解和代谢污染物提供条件。

反之, 抗生素对 MABR 脱氮性能也有一定影响。MABR 硝化过程受抑制程度小于反硝化过程。其抵御高浓度抗生素冲击, 并恢复性能的机制主要依靠外排泵的协同激活, 调控曝气压构建缺氧环境, 利用靶点修饰、酶解失活、膜通透性调控协同降低抗生素摄入等方式实现多元抗性机制的协同作用, 来逐步恢复整个系统的脱氮性能, 其 MABR 处理降解机制如图 6 所示。

在 MABR 处理养殖废水的过程中, 污染物的去除通过污染物迁移、微生物响应与抗生素干扰共同作用。污染物迁移作为物质传递的基础环节, 对不同污染物质迁移速率的差异直接影响着去除率; 而微生物通过筛选关键菌群等机制实现污染物的高效降解与转化。抗生素作为一种干扰因素, 与 MABR 系统间保持着“干扰破坏-稳定恢复”的动态平衡, 这使 MABR 在受到抗生素胁迫影响下, 仍保持对其较高去除率。

未来, 随着降解机理等基础理论的深入研究, MABR 技术会更加有针对性地去除难降解物质。譬如, 在 MABR 中的群感效应, 利用细胞信号分子调控微生物群体行为, 影响生物膜中微生物的代谢活动, 从而提高抗生素的降解效率。一方面, 通过抑制群感效应信号分子的合成或干扰其信号传

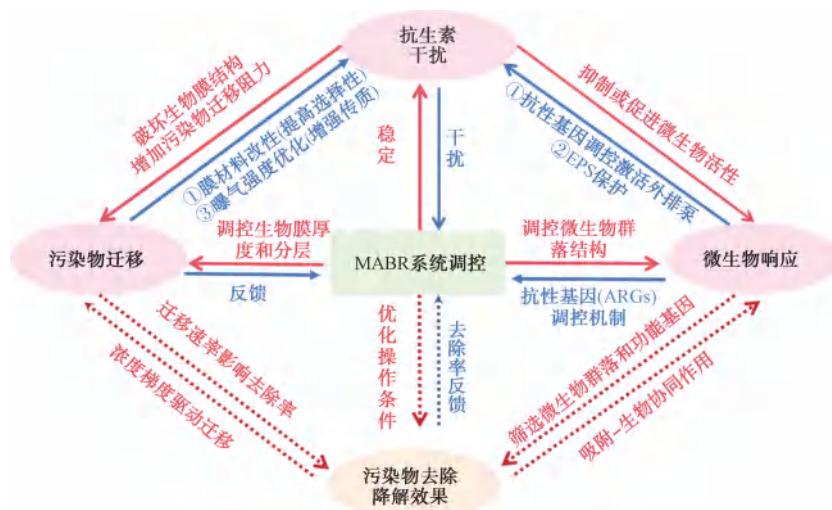
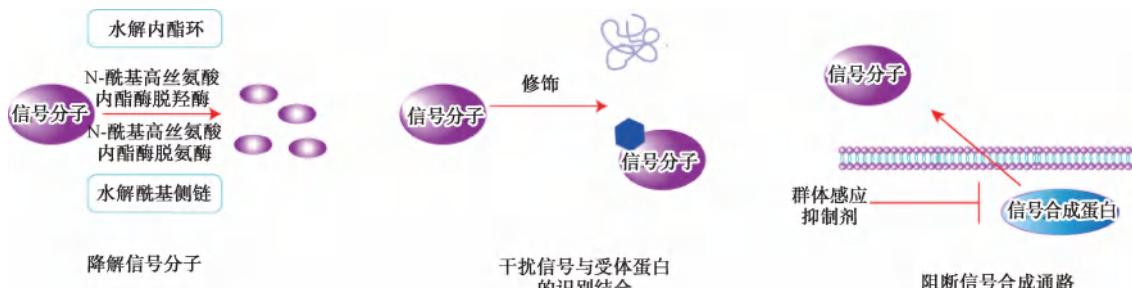


图 6 MABR 处理降解机制

Fig. 6 Degradation Mechanism of MABR Treatment

递, 减少抗性基因在生物膜中的富集和传播, 降低抗生素抗性风险。另一方面, 开发研究适宜的群体感应抑制剂, 可干扰 ARGs 的水平转移路径, 如降解信号分子、干扰信号分子与受体蛋白的识别结合和阻断群体感应信号的合成通路, 如图 7^[57] 所示。MABR 与特定抗生素靶标生物技术的结

合, 有望让 MABR 中的微生物更具针对性地降解抗生素, 在高效去除目标抗生素的同时, 最大程度减少对非目标细菌的干扰。这不仅有助于提升 MABR 处理抗生素废水的效率与质量, 还能有效降低抗药性风险, 为实现抗生素废水的高效、绿色处理开辟全新路径。

图 7 群体感应调控细菌耐药的机制^[57]Fig. 7 Mechanism of Quorum-Sensing for Regulating Bacterial Drug Resistance^[57]

同时, 开展对 MABR 中新型膜材料与载体依赖的研究, 如研制具有抗污染、易于微生物附着和生长新型膜材料和载体, 开发具有抗菌性能的膜材料, 有效减少抗生素在膜表面的吸附和积累, 从而提高生物膜的稳定性和活性。探索多种污染物协同处理工艺, 如同步硝化反硝化、PN/A、藻菌生物膜和微生物燃料电池等新技术的耦合, 可以提高 MABR 处理多种养殖废水的适用性和经济性。在 MABR 的运维方面, 可通过开发基于物联网、大数据和人工智能的 MABR 智能控制系统, 实时精确监测 MABR 运行过程中的水质参数、微生物群落结构和抗生素浓度等

信息。动态调整曝气量或投加功能菌, 确保 MABR 始终维持最佳运行状态。

参考文献

- CHENG D L, NGO H H, GUO W S, et al. Bioprocessing for elimination antibiotics and hormones from swine wastewater [J]. Science of the Total Environment, 2018, 621: 1664–1682. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.10.059.
- 杨杨阳, 丁千, 周子振, 等. 基于文献计量学的畜禽养殖废水处理研究现状及发展趋势 [J]. 环境工程技术学报, 2024, 14(2): 651–662.
YANG Y Y, DING Q, ZHOU Z Z, et al. Research status and

- development trend of livestock and poultry wastewater treatment based on bibliometrics [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2024, 14(2) : 651–662.
- [3] SHAO Y Y, GAO Y, YUE Q Y, et al. Degradation of chlortetracycline with simultaneous removal of copper(II) from aqueous solution using wheat straw-supported nanoscale zero valent iron [J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 379: 122384. DOI: 10.1016/j.cej.2019.122384.
- [4] LI Q H, SONG W F, SUN M G, et al. Composition change and adsorption performance of EPS from *Bacillus vallismortis* sp. induced by Na₂S [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, 185: 109679. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2019.109679.
- [5] WAN H Y, WANG R F, WANG B B, et al. A case study of swine wastewater treatment via electrochemical oxidation by Ti₄O₇ anode [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(21) : 13840.
- [6] LIN B C, LAI Y Y, KE Y Q, et al. Recent advances in biofilm technologies for breeding wastewater treatment: Fundamentals, performance and impacts of antibiotics [J]. Journal of Water Process Engineering, 2024, 62: 105429. DOI: 10.1016/j.jwpe.2024.105429.
- [7] WU Q H, MA H, SU Z J, et al. Impact of marine aquaculture wastewater discharge on microbial diversity in coastal waters [J]. Regional Studies in Marine Science, 2022, 56: 102702. DOI: 10.1016/j.rsma.2022.102702.
- [8] OBAJA D, MAC' E S, COSTA J, et al. Nitrification, denitrification and biological phosphorus removal in piggery wastewater using a sequencing batch reactor [J]. Bioresource Technology, 2003, 87(1) : 103–111.
- [9] CHEN X, YUAN C, ZHY Y, et al. Bioaugmentation with *Acinetobacter* sp. TAC-1 to enhance nitrogen removal in swine wastewater by moving bed biofilm reactor inoculated with bacteria [J]. Bioresource Technology, 2022, 359: 127506. DOI: 10.1016/j.biortech.2022.127506.
- [10] HU Y N, CHENG H F, TAO S. Environmental and human health challenges of industrial livestock and poultry farming in China and their mitigation [J]. Environment International, 2017, 107: 111–130. DOI: 10.1016/j.envint.2017.07.003.
- [11] XIANG Z Z, CHEN X, BAI J, et al. Salt-tolerant heterotrophic nitrification and aerobic denitrification (HNAD) bacterium enhancing a pilot-scale moving bed biofilm reactor (MBBR) treating mariculture wastewater with different COD/TN ratios [J]. Journal of Water Process Engineering, 2022, 50: 103278. DOI: 10.1016/j.jwpe.2022.103278.
- [12] CHEN Y, WANG J, ZHAO Y G, et al. Sulfamethoxazole removal from mariculture wastewater in moving bed biofilm reactor and insight into the changes of antibiotic and resistance genes [J]. Chemosphere, 2022, 298: 134327. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.134327.
- [13] YANG X, YUAN J, GUO W, et al. The enzymes-based intermediary model explains the influence mechanism of different aeration strategies on nitrogen removal in a sequencing batch biofilm reactor treating simulated aquaculture wastewater [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 356: 131835. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.131835.
- [14] LU S, WANG Q, GAO M, et al. Effect of aerobic/anoxic duration on the performance, microbial activity and microbial community of sequencing batch biofilm reactor treating synthetic mariculture wastewater [J]. Bioresource Technology, 2021, 333: 125198. DOI: 10.1016/j.biortech.2021.125198.
- [15] HE Y Q, LIAN J, WANG L, et al. Recovery of nutrients from aquaculture wastewater: Effects of light quality on the growth, biochemical composition, and nutrient removal of *Chlorella sorokiniana* [J]. Algal Research, 2023, 69: 102965. DOI: 10.1016/j.algal.2022.102965.
- [16] YANG P J, PENG S H, BENANI N, et al. An integrated evaluation on China's provincial carbon peak and carbon neutrality [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 377: 134497. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.134497.
- [17] QIAN Y F, LI Y ZH, YU H, et al. Greenhouse gas control in steel manufacturing: Inventory, assurance, and strategic reduction review [J]. Carbon Research, 2024, 3(1) : 27. DOI: 10.1007/s44246-024-00118-z.
- [18] HOU F F, LI B A, XING M H, et al. Surface modification of PVDF hollow fiber membrane and its application in membrane aerated biofilm reactor (MABR) [J]. Bioresource Technology, 2013, 140: 1–9. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.04.056.
- [19] TIAN H L, XU X J, QU J H, et al. Biodegradation of phenolic compounds in high saline wastewater by biofilms adhering on aerated membranes [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 392: 122463. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.122463.
- [20] LI M, CAO X W, WU Z Q, et al. Insights on nitrogen and phosphorus removal mechanism in a single-stage membrane aeration biofilm reactor (MABR) dominated by denitrifying phosphorus removal coupled with anaerobic/aerobic denitrification [J]. Journal of Water Process Engineering, 2023, 52: 103583. DOI: 10.1016/j.jwpe.2023.103583.
- [21] 江兴. 膜曝气生物膜反应器处理低碳氮比市政污水的同步脱氮除碳研究 [D]. 广州: 广州大学, 2022.
- JIANG X. Study on simultaneous nitrogen and carbon removal from municipal wastewater with low C/N ratio by membrane aerated biofilm reactor [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2022.
- [22] 中华人民共和国生态环境部. 2022 年中国生态环境统计年报 [R/OL]. (2023-12-29) [2025-06-11]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/sthjtjb/202312/W02023122933954004481.pdf>.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of

- China. 2022 China ecological environment statistical annual report [R/OL]. (2023-12-29) [2025-06-11]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/sthtjnb/202312/W020231229339540004481.pdf>.
- [23] GONG W J, FAN A L, ZHANG H, et al. Cow manure anaerobic fermentation effluent treatment by oxygen-based membrane aerated biofilm reactor [J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 395: 125116. DOI: 10.1016/j.cej.2020.125116.
- [24] TERADA A, HIBIYA K K, NAGAI J, et al. Nitrogen removal characteristics and biofilm analysis of a membrane-aerated biofilm reactor applicable to high-strength nitrogenous wastewater treatment [J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2003, 95(2): 170–178.
- [25] 贺梦莹,徐超,李海霞,等. PVDF膜生物反应器处理养殖废水的实验研究[J].环境技术,2025,38(1):14–18.
- HE M Y, XU C, LI H X, et al. Study on the treatment of aquaculture wastewater by PVDF membrane bioreactor [J]. Environmental Science and Technology, 2025, 38(1): 14–18.
- [26] 孙浩翔,刘德利,蓝丽华,等. 探究C:N对MABR处理水产养殖废水水质影响[J].环境科学与技术,2019,42(2):163–169.
- SUN H X, LIU D Z, LAN L H, et al. Investigation of the effect of C : N ratio on the water quality of aquaculture wastewater treated by MABR [J]. Environmental Science & Technology, 2019, 42(2): 163–169.
- [27] 王宇,吴宁,罗鑫,等. MABR强化型三池两坝技术在水产养殖尾水治理上的应用研究[J].中国水产,2024(12):96–98.
- WANG Y, WU N, LUO X, et al. Application study on MABR-enhanced three-pond two-dam technology in the treatment of aquaculture tail water [J]. China Fisheries, 2024(12): 96–98.
- [28] 赵丽,王毅力. AMBR-MABR耦合工艺处理模拟畜禽养殖废水的启动和运行[J].环境工程学报,2017,11(11):5799–5809.
- ZHAO L, WANG Y L. Start-up and operation of anaerobic migrating blanket reactor-membrane biofilm bioreactor (AMBR-MABR) coupling process treating synthetic livestock wastewater [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11 (11): 5799–5809.
- [29] DUAN H R, ZHAO Y F, KOCH K, et al. Insights into nitrous oxide mitigation strategies in wastewater treatment and challenges for wider implementation [J]. Environmental Science & Technology, 2021, 55(11): 7208–7224.
- [30] KOZLOWSKI J A, PRICE J L, STEIN L Y. Revision of N₂O-producing pathways in the ammonia-oxidizing bacterium *nitrosomonas europaea* ATCC 19718 [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2014, 80(16): 4930–4935.
- [31] KINH C T, SUENAGA T, HORI T, et al. Counter-diffusion biofilms have lower N₂O emissions than co-diffusion biofilms during simultaneous nitrification and denitrification: Insights from depth-profile analysis [J]. Water Research, 2017, 124: 363–371. DOI: 10.1016/j.watres.2017.07.058.
- [32] LI J G, FENG M B, ZHENG S K, et al. The membrane aerated biofilm reactor for nitrogen removal of wastewater treatment: Principles, performances, and nitrous oxide emissions [J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 460: 141693. DOI: 10.1016/j.cej.2023.141693.
- [33] HE H Q, GLEN T, DAIGGER. The hybrid MABR process achieves intensified nitrogen removal while N₂O emissions remain low [J]. Water Research, 2023, 244: 120458. DOI: 10.1016/j.watres.2023.120458.
- [34] 宋舒兴,杨一铭,张烨铠,等. 膜曝气生物膜反应器处理生活污水N₂O等温室气体的排放特性[J].环境工程学报,2023,17(9):2872–2878.
- SONG S X, YANG Y M, ZHANG Y K, et al. Emission characteristics of N₂O and other greenhouse gases from membrane aerated biofilm reactor treating domestic wastewater [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17 (9): 2872 – 2878.
- [35] SHAO Y T, WANG Y P, YUAN Y J, et al. A systematic review on antibiotics misuse in livestock and aquaculture and regulation implications in China [J]. Science of the Total Environment, 2021, 798: 149205. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.149205.
- [36] KIM H, HONG Y M, PARK J E, et al. Sulfonamides and tetracyclines in livestock wastewater [J]. Chemosphere, 2013, 91(7): 888–894.
- [37] 卢信,罗佳,高岩,等. 畜禽养殖废水中抗生素和重金属的污染效应及其修复研究进展[J].江苏农业学报,2014,30(3):671–681.
- LU X, LUO J, GAO Y, et al. Research advances in pollution effects and remediation of antibiotics and heavy metals in livestock and poultry wastewater [J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2014, 30(3): 671–681.
- [38] HOU J, CHEN Z, GAO J, et al. Simultaneous removal of antibiotics and antibiotic resistance genes from pharmaceutical wastewater using the combinations of up-flow anaerobic sludge bed, anoxic-oxic tank, and advanced oxidation technologies [J]. Water Research, 2019, 159: 511 – 520. DOI: 10.1016/j.watres.2019.05.034.
- [39] LAI Y S, ONTIVEROS-VALENCIA A, ILHAN Z E, et al. Enhancing biodegradation of C16-alkyl quaternary ammonium compounds using an oxygen-based membrane biofilm reactor [J]. Water Research, 2017, 123: 825 – 833. DOI: 10.1016/j.watres.2017.07.003.
- [40] MEI X, GUO Z H, LIU J, et al. Treatment of formaldehyde wastewater by a membrane-aerated biofilm reactor (MABR): The degradation of formaldehyde in the presence of the cosubstrate methanol [J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 372 : 673–

683. DOI: 10.1016/j.cej.2019.04.184.
- [41] 毕晓敏, 程方, 毕飞, 等. 诺氟沙星对MABR处理生活污水的影响[J]. 水处理技术, 2023, 49(8): 110–114.
- BI X M, CHENG F, BI F, et al. Effect of norfloxacin on MABR treatment of domestic sewage [J]. Technology of Water Treatment, 2023, 49(8): 110–114.
- [42] SONG Z X, ZHANG L, YANG J C, et al. Achieving high nitrogen and antibiotics removal efficiency by nZVI-C in partial nitritation/anammox system with a single-stage membrane-aerated biofilm reactor[J]. Journal of Hazardous Materials, 2024, 473: 134626. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2024.134626.
- [43] ÇELIK A, CASEY E, HASAR H. Degradation of oxytetracycline under autotrophic nitrifying conditions in a membrane aerated biofilm reactor and community fingerprinting [J]. Journal of Hazardous Materials, 2018, 356: 26–33. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2018.05.040.
- [44] MA Y X, HUANG J, HAN T W, et al. Comprehensive metagenomic and enzyme activity analysis reveals the negatively influential and potentially toxic mechanism of polystyrene nanoparticles on nitrogen transformation in constructed wetlands [J]. Water Research, 2021, 202: 117420. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117420.
- [45] LIN B C, HU T Q, XU Z H, et al. Stratified biofilm structure of MABR enabling efficient ammonia removal from aquaculture medicated bath wastewater [J]. Water Research, 2025, 277: 123326. DOI: 10.1016/j.watres.2025.123326.
- [46] LI T, CAO X W, WU Z Q, et al. Biotransformation of nitrogen and tetracycline by counter-diffusion biofilm system: Multiple metabolic pathways, mechanism, and slower resistance genes enrichment [J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 474: 145637. DOI: 10.1016/j.cej.2023.145637.
- [47] TAŞKAN B, CASEY E, HASAR H. Simultaneous oxidation of ammonium and tetracycline in a membrane aerated biofilm reactor [J]. Science of the Total Environment, 2019, 682: 553–560. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.05.111.
- [48] AYDIN E, ERDEM M, CASEY E, et al. Oxidation mechanism of chlortetracycline in a membrane aerated biofilm reactor [J]. Environmental Technology and Innovation, 2021, 24: 101910. DOI: 10.1016/j.eti.2021.101910.
- [49] LI T, CAO X W, GU L J, et al. Metabolism of nitrogen and sulfamethoxazole, performance recovery mechanism, and antibiotic resistance genes (ARGs) behaviors in membrane aerated biofilm reactor (MABR) [J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 481: 144172. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.144172.
- [50] XIA Z G, NG H Y, XU D, et al. Lumen air pressure regulated multifunctional microbiotas in membrane-aerated biofilm reactors for simultaneous nitrogen removal and antibiotic elimination from aquaculture wastewater [J]. Water Research, 2024, 251: 121102. DOI: 10.1016/j.watres.2024.121102.
- [51] LI J L, LI J, ZHANG Y L, et al. The responses of marine anammox bacteria-based microbiome to multi-antibiotic stress in mariculture wastewater treatment [J]. Water Research, 2022, 224: 119050. DOI: 10.1016/j.watres.2022.119050.
- [52] FU J J, HUANG D Q, BAI Y H, et al. How anammox process resists the multi-antibiotic stress: Resistance gene accumulation and microbial community evolution [J]. Science of the Total Environment, 2022, 807: 150784. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.150784.
- [53] DARBY E M, TRAMPARI E, SSIASAT P S, et al. Molecular mechanisms of antibiotic resistance revisited [J]. Nature Reviews Microbiology, 2022, 21(5): 280–295.
- [54] 张吉盛. MABR强化典型痕量抗生素和碳氮污染物同步去除的运行机理研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2024.
- ZHANG J S. Study on the operational mechanism of MABR for simultaneous removals of nitrogen, carbon and trace antibiotics [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2024.
- [55] REN L H, CHEN M, ZHENG J J, et al. Efficacy of a novel electrochemical membrane-aerated biofilm reactor for removal of antibiotics from micro-polluted surface water and suppression of antibiotic resistance genes [J]. Bioresource Technology, 2021, 338: 125527. DOI: 10.1016/j.biortech.2021.125527.
- [56] ZHANG H, GONG W Y, YANG X, et al. Simulated-sunlight enhances membrane aerated biofilm reactor performance in sulfamethoxazole removal and antibiotic resistance genes reduction [J]. Water Research, 2023, 247: 120747. DOI: 10.1016/j.watres.2023.120747.
- [57] 夏乐欣, 周慧, 徐峰. 群体感应调控细菌耐药的机制[J]. 中华结核和呼吸杂志, 2022, 45(12): 1260–1266.
- XIA L X, ZHOU H, XU F. Mechanism of quorum sensing regulating bacterial drug resistance [J]. Chinese Journal of Tuberculosis and Respiratory Diseases, 2022, 45(12): 1260–1266.