

DOI: 10.3969/j.issn.1671-024x.2026.01.006

污水中抗生素抗性基因的分布与去除研究进展

王亮^{1,2,3}, 杨翠翠^{1,2}, 莫颖慧^{1,2}, 王景峰⁴, 黄聪⁵, 王先锋⁵

(1. 天津工业大学 环境科学与工程学院, 天津 300387; 2. 天津工业大学 先进分离膜材料全国重点实验室, 天津 300387; 3. 沧州市天津工业大学研究院, 河北 沧州 061000; 4. 军事科学院 军事医学研究院环境医学与作业医学研究所, 天津 300201; 5. 天津市天水智信基础设施建设运营有限公司, 天津 300400)

摘要: 抗生素抗性基因(antibiotic resistance genes, ARGs)作为新型环境污染物之一,对人类健康和生态系统造成了巨大的潜在风险问题。系统总结了污水中 ARGs 的分布情况与检测方法,重点介绍了 ARGs 的直接去除和间接去除工艺,包括人工湿地、膜生物反应器等生物处理方法,以及高级氧化技术、膜分离技术、消毒间接去除技术等,对各种工艺的去除机制、去除性能及优缺点进行分析,并提出建议:应针对常见的大环内酯类、磺胺类及四环素类等 ARGs 开展定时检测;采用复合技术对 ARGs 进行高效去除。

关键词: 抗性基因; 抗生素; 污水; 处理技术; 研究进展

中图分类号: TQ051.8; X703

文献标志码: A

文章编号: 1671-024X(2026)01-0038-09

Research progress on distribution and removal of antibiotic resistance genes in wastewater

WANG Liang^{1,2,3}, YANG Cuicui^{1,2}, MO Yinghui^{1,2}, WANG Jingfeng⁴, HUANG Cong⁵, WANG Xianfeng⁵

(1. School of Environmental Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Separation Membrane Materials, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 3. Cangzhou Institute of Tiangong University, Cangzhou 061000, Hebei Province, China; 4. Institute of Environmental and Operational Medicine, Academy of Military Medicine, Academy of Military Sciences, Tianjin 300201, China; 5. Tianjin Tianshui Zhixin Infrastructure Construction and Operation Co., Ltd., Tianjin 300400, China)

Abstract: Antibiotic resistance genes (ARGs) as one of the emerging environmental pollutants, pose significant potential risks to human health and ecosystems. The distribution and detection methods of ARGs in wastewater are systematically summarized, with a focus on introducing direct and indirect ARG removal processes. These processes include biological treatment methods such as constructed wetlands and membrane bioreactors, advanced oxidation technologies, membrane separation technologies, and indirect disinfection removal technologies. The removal mechanisms, performance, advantages and disadvantages of various processes are analyzed, and suggestions are put forward: regular detection should be carried out for common ARGs such as macrolides, sulfonamides and tetracyclines; composite technologies should be adopted for efficient removal of ARGs.

Key words: resistance gene; antibiotics; wastewater; treatment technology; research progress

自20世纪30年代弗莱明发现青霉素以来,人们对抗生素的研究与应用越来越广泛,其在人类健康保护、畜牧业和农业生产领域发挥了不可替代的作用。然而由于抗生素被多用滥用,微生物对原本敏感的抗生素产生了耐受性,由此导致抗性菌的产生,同时产

生抗性基因(antibiotic resistance genes, ARGs),给人类健康和公共卫生安全带来了潜在威胁^[1-2]。

各种含有 ARGs 的废水被排放至污水处理厂,而传统生物处理工艺难以有效处理含 ARGs 的污水^[3],导致含有 ARGs 的污水被排放至环境中,污泥中高丰度

收稿日期: 2024-04-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(51978465); 河北省自然科学基金重点项目(B2023110025); 河北省自然科学基金面上项目(E2023110010); 沧州市天津工业大学研究院产业孵化项目(TGCYY-Z-0101)

通信作者: 王亮(1979—),男,博士,教授,主要研究方向为膜法水处理技术。E-mail:mashi7822@163.com

的细菌进一步促进了 ARGs 的传播,导致细菌耐药性污染愈发严重,污水处理厂也由此成为了 ARGs 的主要传播源。因此,迫切需要了解污水中 ARGs 的分布情况,并实施有效技术去除污水中的 ARGs。

1 污水中 ARGs 的分布情况

污水中常见的 ARGs 有 β -内酰胺类(*bla*_{CTXM}、*bla*_{TEM}、*bla*_{OXA-A}、*bla*_{SHV}、*mec*_A)、喹诺酮类(*qnr*_S、*qnr*_C、*qnr*_D)、磺酰胺类(*sul*₁、*sul*₂、*dhfr*₁)、四环素类(*tet*_A、*tet*_B、*tet*_E、*tet*_G、*tet*_H、*tet*_S、*tet*_T、*tet*_{XX})、大环内酯类(*ere*_A、*erm*_B、*erm*_C、*erm*₄₃)和 1 类整合子(*int*₁)抗性基因。其中,*bla*_{CTXM}、*bla*_{TEM}、*sul*₁、*sul*₂、*tet*_O、*tet*_Q、*tet*_W 和 *erm*_B 最为常见^[4]。Pires 等^[5]从 5 个污水处理厂检测到 *bla*_{CMY} 和 *bla*_{TEM} 的含量最高,可达 4.7×10^4 copies/L。污水中 ARGs 分布与季节、人口规模等有关,并呈现明显的时空差异^[6-7],但最大的影响因素是区域抗生素使用情况,各个地区使用抗生素不同,污水中 ARGs 种类也有所不同。Zhuang 等^[8]总结了 1990 年—2020 年六大洲不同区域的 ARGs 分布情况,发现磺酰胺类和四环素类 ARGs 在污水处理厂中最为常见。Pärnänen 等^[9]研究调查了欧洲国家 12 个污水处理厂中 ARGs 的分布情况,结果表明,*bla*_{GES}、*bla*_{OXA}、*bla*_{VEB}、*ere*_A、*erm*_F、*sul*₁、*tet*_M、*tet*_Q、氨基糖苷类(*aad*_A、*str*_B)和多药耐药(*qac*_E Δ ₁、*qac*_H)普遍存在。Yin 等^[10]利用宏基因组测序,对香港地区 3 个污水处理厂的进水和出水进行检测,结果表明,出水中依然存在 21 种 ARGs 类型,其中喹诺酮类、 β -内酰胺和磺酰胺类 ARGs 普遍存在;又有研究者对中国东部农村地区的 6 个污水处理厂中进水和出水的 ARGs 进行分析检测,结果在进水中鉴定出了 66 种 ARGs,主要包括杆菌肽、四环素、磺胺和青霉素类 ARGs,在出水中鉴定出 64 种 ARGs^[11]。

由于医院及养殖业抗生素需求量较大,制药废水和养殖废水中也就出现了多类型、高水平的 ARGs。Guo 等^[12]测定了来自中国东南部的 6 个制药废水处理厂中的 ARGs 种类及其丰度,检测到了大量喹诺酮类和大环内酯类 ARGs,最高丰度可达 10^7 copies/mL;Rui 等^[13]从 4 个养殖废水处理厂检测出高丰度的万古霉素类 ARGs。由此可知,污水系统中的 ARGs 现如今已成为全球性治理问题。

2 ARGs 检测方法

检测 ARGs 的方法可以主要分为传统微生物培养

法和分子生物学方法。

传统微生物培养法成本低、操作简单,为鉴定抗性菌的种属类型、了解 ARGs 的宿主特征提供了基础。如 Li 等^[14]在 LB 选择培养基中添加 50.4 mg/L 磺胺甲恶唑、32 mg/L 氯霉素、16 mg/L 四环素,用以辨别磺胺甲恶唑类抗性菌、氯霉素类抗性菌和四环素类抗性菌。

分子生物学方法一般包括聚合酶链式反应(polymerase chain reaction, PCR)方法、宏基因组学法等。PCR 是最经典、最常用的 ARGs 检测方法,但普通 PCR 技术对 ARGs 主要起定性作用,研究中常用实时荧光定量 PCR(real-time quantitative PCR, qPCR)技术来定量分析 ARGs,从而可以从数量上直观地观察 ARGs 的水平。Keenum 等^[15]通过 qPCR 技术定量检测 *sul*₁、*tet*_A、*van*_A、*bla*_{CTX-M} 等几类 ARGs;Wang 等^[16]通过 qPCR 技术分析了 *qnr*_D、*qnr*_S、*erm*_A、*erm*_B 等几种 ARGs。宏基因组学法通过直接提取和克隆微生物中的 DNA 进行基因组分析,此技术不局限于已知序列的 ARGs,不需要分离纯化目标微生物,通过配合新一代测序技术,还可以发现新型的 ARGs^[17]。Hendriksen 等^[18]采用宏基因组分析了来自 60 个国家的 79 个地点污水中的细菌耐药株;苏志国等^[19]采用宏基因组技术对不同污水处理系统中的 ARGs 进行了分析。

3 ARGs 典型去除技术及其去除效果

3.1 直接去除

直接去除是指直接作用于 ARGs,通过各个技术相应机理实现对 ARGs 的去除。本文介绍的去直接去除方法分为生物、化学、物理处理技术。

3.1.1 生物处理技术

生物处理技术对污水中 ARGs 有一定去除效果,本文主要介绍人工湿地及膜生物反应器(membrane bio-reactor, MBR)。

人工湿地处理污水具有低运行成本、低能耗、便于维护等优点,其去除 ARGs 的机理主要是植物吸收、物理吸附和生物降解,且生物填料和分布在植物根际的生物膜可以吸附截留 ARGs^[20]。

通过人工湿地技术去除污水中 ARGs 的影响因素众多,包括人工湿地结构、底物、ARGs 类型以及水力停留时间、水力负荷等操作参数。根据结构划分,可分为表面流人工湿地、水平潜流人工湿地和垂直潜流人工湿地 3 种。相对来说,垂直潜流式湿地具有占地面积小、处理效率高等优点,对污水中 ARGs 的去除效率最高^[21],但人工湿地占地面积大且 ARGs 易累积。

MBR 因其具有运行管理方便、占地面积少、污泥停留时间长、污泥产量低等显著优势,在污水处理领域被广泛应用。其去除的机理是将膜过滤与生物处理工艺相结合,利用膜的过滤作用将生化反应池中的活性污泥和污染物截留^[22-23]。

MBR 技术去除 ARGs 效率受多种因素影响,包括微生物群落、温度、水质、水力停留时间、污泥停留时间以及操作参数等^[24]。研究证明:污泥停留时间是影响 ARGs 去除效率的最主要因素^[25],污泥停留时间与 ARGs 去除率呈正相关;除污泥停留时间外,膜污染程度也与 ARGs 去除率密切相关,膜污染程度越重,

ARGs 去除率越高。MBR 虽可显著减少出水中 ARGs 的丰度,但是这些 ARGs 其实主要是被污泥或膜材料所吸附,并不能真正去除 ARGs。

表 1 总结了生物处理技术去除 ARGs 的效果。生物处理技术主要通过吸附去除污水中 ARGs,对 ARGs 有一定的去除效果,但并没有实现对 ARGs 的完全去除。今后研究建议:对于人工湿地,应结合实际情况,建立不同湿地预测模型,优化参数构成,选择适合的运行方式及流态;对于 MBR 技术,需在处理参数优化及污泥处置方面深入研究,尽量避免 ARGs 的二次污染。

表 1 生物处理技术对 ARGs 的去除效果

Tab.1 Removal efficiency of ARGs by biological treatment technology

序号	处理技术类型	ARGs 类型	去除效果	参考文献
1	垂直潜流型人工湿地	<i>sul1, sul2, sul3, tetG, tetM, tetO, tetX, ermB, ermC, cmlA, floR</i>	63.9%~84%	[21]
		<i>sul1, qnrS, bla_{CTXM32}</i>	1~3 log	[26]
2	表面流型人工湿地	<i>tetO, tetC, tetW, tetX, sul1, sul2</i>	82.1%~90.65%	[27]
3	水平潜流型人工湿地	<i>qepA, qnrA, qnrB, qnrD, sul1, sul3, tet(34), tetB, tetM, tetV</i>	36.5%~58.2%	[28]
4	厌氧/好氧 MBR	<i>bla_{KPC}, bla_{NDM}, bla_{SHV}, ermB, int11, sul1, tetO</i>	3 log	[29]
5	厌氧/好氧 MBR	<i>tetA, tetE, tetM, tetQ, tetW, tetX, sul1, sul2</i>	87.91%	[30]
6	厌氧 MBR	<i>ermB, tetO, sul1, int11</i>	3.3~3.6 log	[31]
7	厌氧 MBR	<i>bla_{TEM}, int11, tetO, tetW, ermB</i>	与细胞相关的 ARGs 减少了 95.97%	[32]
8	厌氧/缺氧/好氧 MBR	<i>tetA, tetQ, tetW, sul1, sul2, int11</i>	1.37 log	[33]

3.1.2 化学处理技术

高级氧化技术(advanced oxidation process, AOP)是污水处理研究中典型的化学处理技术, AOP 泛指产生强氧化性和无选择性的羟基自由基($\cdot\text{OH}$),破坏污染物结构并使其氧化降解成低毒或无毒的小分子有机物的化学氧化技术^[34]。

光催化氧化技术去除 ARGs 因其高效率、反应速度快等特点被广泛研究,此技术利用光催化剂,吸收可见光或紫外光(Ultraviolet, UV)并产生活性氧,如 O_2^- 、 $\cdot\text{OH}$,从而氧化去除 ARGs^[35-36]。相对于单纯的 UV 消毒,光催化技术去除 ARGs 的效果更好,在 Das 等^[37]的研究中,UV/ H_2O_2 处理后的 ARGs 去除率比 UV 处理提高了 1.5 倍^[38]。然而,光催化剂的使用成本高以及使用剂量大是一大挑战。

Fenton 氧化技术在 ARGs 去除方面也被广泛研究,在酸性条件下, H_2O_2 通过 Fe^{2+} 催化分解产生 $\cdot\text{OH}$,并引发更多活性氧,从而氧化去除 ARGs。还有研究者比较了 $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$ 和 UV/ H_2O_2 过程对污水中目标 ARGs 的去除率,结果表明, Fenton 法的氧化效果好于 UV/ H_2O_2 法,去除率为 2.58~3.79 log^[39]。Fenton 工艺对 ARGs 去除率的影响因素包括 Fenton 试剂的浓度、 $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$ 的摩尔比、pH 值和反应时间等^[40]。过量的 Fenton 试剂会

削减 $\cdot\text{OH}$ 的生成量,从而降低 ARGs 的去除率^[41];当 pH 值升高时,溶液中 Fe^{2+} 沉淀的催化活性会逐渐丧失;而当 pH 值降低时,溶液中的 Fe^{3+} 难以还原为 Fe^{2+} , $\cdot\text{OH}$ 的产生效率就会相应地降低^[42]。Fenton 氧化虽实现了对 ARGs 的有效去除,但 Fenton 氧化会产生大量的 Fe^{2+} ,造成二次污染,且 Fenton 氧化过程中有机物的氧化会产生有毒有机产物^[43],增加后续处理的成本和难度。

表 2 总结了部分高级氧化技术去除 ARGs 的效果。化学处理工艺对 ARGs 降解彻底,处理效果好,但成本较高,如何解决成本问题是化学处理工艺中的一大难点。今后研究建议:对于光催化氧化技术,应提高现有光催化剂活性,并创新开发高效能、低成本的光催化剂;对于 Fenton 氧化技术,应控制好 pH 值、 H_2O_2 量等,通过优化反应条件增加 ARGs 去除率并降低成本,减少二次污染的产生。

3.1.3 物理处理技术

在用于污水处理的物理处理技术中,膜分离技术因其高处理效率、低运营成本、无相变等特点被广泛运用。膜分离技术去除 ARGs 的机制主要基于尺寸排阻和静电效应。表 3 总结了物理处理技术对 ARGs 的去除效果。

表 2 化学处理技术对 ARGs 的去除效果

Tab.2 Removal efficiency of ARGs by chemical treatment technology

序号	处理技术类型	ARGs 类型	去除效果	参考文献
1	UV/H ₂ O ₂	<i>sul1, tetX, tetG</i>	1.55~2.32 log	[39]
2	Fe ²⁺ /H ₂ O ₂	<i>sul1, tetX, tetG</i>	2.58~3.79 log	[39]
3	UV/Ag/AgBr/g-C ₃ N ₄	<i>tetA, tetM, tetQ</i>	49%~86%	[44]
4	Solar-Fenton	<i>katA1, katA2, katMn, katE, ahpCF, gpx1, gpx2, gpx3</i>	44%	[45]
5	Solar-Fenton	<i>sul1, sul2, erm(F), mph(A), mph(E), msr(E), tetA, tetB, tetO, tetW, aadA, aph(3''), aph(6), strA</i>	55%~99%	[46]
6	Photo-Fenton	<i>i-tetA, i-bla_{TEM-1}</i>	4.18 log, 4.14 log	[47]
7	Photo-Fenton	<i>e-tetA, e-bla_{TEM-1}</i>	4.85 log, 5.80 log	[48]

表 3 物理处理技术对 ARGs 的去除效果

Tab.3 Removal efficiency of ARGs by physical treatment technology

序号	处理技术类型	ARGs 类型	去除效果	参考文献
1	NF, RO	<i>sul1, sul2, tetA, tetM, tetW</i>	4.98~8.12 log, 5.28~9.52 log	[49]
2	100 kDaUF, 10 kDaUF, 1 kDaUF	<i>vanA, bla_{TEM}</i>	0.9 log, 3.6 log, 4.2 log	[50]
3	MF	<i>tet, sul, erm, qnr</i>	1.0~4.3 log	[51]
4	NF	<i>tetA, tetW, sulI, sulIII</i>	4.83~5.67 log	[52]
5	PAC-UF	<i>tetA, tetW, sulI, sulIII</i>	1.35~3.35 log	[53]
6	MAC-UF	<i>sul1, sul2, sul3, tetM, tetQ, tetW</i>	1.96~4.33 log	[54]
7	Fe(VI)-UF	<i>tetM, tetO, tetW, sul1, sul2, ermB, ermF, aac(6')-Ib-cr, qnrS, int11, 16S rRNA</i>	3.26~5.01 log	[55]

膜根据孔径大小不同被分为微滤(microfiltration, MF)、超滤(ultrafiltration, UF)、纳滤(nanofiltration, NF)、反渗透(reverse osmosis, RO)膜。膜分离技术对 ARGs 的去除率受多种情况影响,包括膜类型、膜材质、ARGs 类型、膜污染和操作参数等,研究表明 ARGs 的去除率随膜孔径增大而减小,UF 无法有效去除 ARGs^[56],截留分子质量小于 5 ku 的过滤膜可以截留 99.80%以上含有 ARGs 的纯质粒和线状片段^[57]。相较于 MF 和 UF, NF 和 RO 的膜孔径较小,对于 ARGs 有明显的去除效果。Lan 等^[49]采用一系列集成装置包括 MF、UF、NF 和 RO 处理水中 ARGs,发现 NF 和 RO 装置对 ARGs 的去除率在所有处理中最高,NF、RO 膜对 ARGs 的截留值分别为 4.98~8.12 log、5.28~9.52 log。

物理处理技术去除 ARGs 的效果虽然较好,但是无法实现对 ARGs 的完全去除降解,可能会存在富集现象。对于膜分离技术,建议研究改性膜材料或与其他技术相互结合,实现对 ARGs 的消除降解,如膜分离/AOP,既保证了 ARGs 的高截留,也实现了对 ARGs 的降解。

3.2 间接去除

间接去除是指不与 ARGs 接触,通过控制细菌生长,间接地实现对 ARGs 去除的方法。本文介绍的间接去除方法为消毒工艺,消毒工艺可以通过控制细菌总量,间接地去除 ARGs。消毒工艺已广泛用于污水处

理,常见的消毒工艺主要有氯化、臭氧及 UV。

氯化消毒是世界范围内最普遍的消毒方法之一。氯化消毒去除 ARGs 的机制分为两方面:一方面,氯会破坏细胞壁并改变细胞膜通透性,导致 DNA 和蛋白质等细胞成分泄漏;另一方面,在水中含氯消毒剂发生化学反应生成次氯酸根(OCl⁻)和次氯酸(HOCl),HOCl 的中性小分子可以穿透微生物,破坏细菌的磷酸脱氢酶系统,这种破坏会导致细菌的糖代谢失调,从而引发细菌死亡并去除 ARGs^[58-59]。Stange 等^[60]采用 0.5 mg/L Cl₂ 在 30 min 内可去除 0.8~2.8 log ARGs; Zhang 等^[61]采用 4 mg/L Cl₂ 在 30 min 内可去除 3.59 log tetA。显然,添加较大剂量的 Cl₂ 可以提高 ARGs 去除率,但与此同时,多余的余氯和其副产物会对环境产生负面影响。研究表明,消毒剂的过量使用可能会加速抗生素耐药性的传播^[62],氯化后留在出水中的 ARGs 可能通过病原体携带对人类健康构成潜在风险^[63];污水中广泛分布的溴化物和碘化物会促进 ARGs 的水平转移^[64]。

臭氧(O₃)作为氧化剂和消毒剂,其消毒机制是利用 O₃ 与有机分子反应并发生部分水解,生成氧化能力更强的·OH, O₃ 及·OH 通过与肽聚糖、蛋白质及脂类快速反应破坏细胞膜,改变细胞膜和细胞壁的通透性,导致细胞失活,达到去除 ARGs 的目的^[65]。O₃ 消毒对 ARGs 的去除效率与 O₃ 含量、反应时间、ARGs 类型

等相关,在 O_3 质量浓度为 2 mg/L 时,对四环素类 ARGs 丰度的平均去除率为 49.2%,但对磺胺类 ARGs 的平均去除率却为 34.5%^[66]。研究表明 O_3 剂量越高,细胞膜破坏程度越大,因此,需要更高剂量的 O_3 才能达到理想的灭活效果^[67]。然而,使用高剂量 O_3 进行消毒时会产生一些有毒的副产物,可能会进一步造成更严重的风险。

UV 消毒因不会形成有害或有毒的副产品、易于操作且对环境友好成为常用的污水处理技术。UV 消毒去除 ARGs 的机理是细胞中的 DNA 和 RNA 吸收适当波长的 UV 后,分子结构被破坏,此外,在波长为 315~400 nm 的 UV 照射过程中可能会产生活性氧,导致 DNA 不可修复的氧化损伤^[68],从而去除 ARGs。UV 消毒对 ARGs 的去除效率随着 UV 的剂量增加而增加,Zheng 等^[66]的研究表明当 UV 剂量低于 40 mJ/cm² 时,对四环素类 ARGs 的去除效率在 52.0%~73.5% 之间,但当 UV 剂量加大至 160 mJ/cm² 时,其去除率提高至 79.7%~92.0%。显然,采用 UV 消毒去除污水中 ARGs 需要很强的 UV 照射剂量,但这对于常规污水处理是不现实的。

表 4 对比了不同的消毒工艺对 ARGs 的去除效果。消毒技术虽然间接去除了污水中的 ARGs,但是在处理过程中需要高剂量的消毒剂才能够达到效果,这对于实际污水处理来说是一个很大的难题。建议在今后的研究中,将多种消毒技术相结合,如 UV/臭氧、UV/氯化等,通过 UV 消毒对细胞分子结构造成损伤后,再采用臭氧或氯化的方法破坏细菌表面结构,从而彻底灭活细菌,这种联合消毒方法可以在考虑实际成本的同时,克服单一消毒技术的不足。另外,进一步开发高效能、低成本,对环境友好的消毒剂,并关注消毒副产物的形成机制及消除方法,控制 ARGs 进一步传播。

表 4 消毒技术对 ARGs 的去除效果

Tab.4 Removal efficiency of ARGs by disinfection technology

序号	消毒类型	ARGs 类型	去除效果	参考文献
1		<i>tetA, ampC, vanA, ermB</i>	0.8~2.8 log	[60]
2	氯化消毒	<i>tetA</i>	3.59 log	[61]
3		<i>korA, korB, trbA, trbBp, trfAp, traF, traJ, ompA, ompF, ompC</i>	85%~99%	[69]
4	臭氧消毒	<i>sul1, sul2, tetW, tetM, amp</i>	5.44~7.13 log	[70]
5		<i>tetA, tetM, tetO, tetW, sulI, sulII</i>	34.5%~49.2%	[66]
6	紫外消毒	<i>tetA, cat1, ampC</i>	1.91 log, 1.71 log, 1.45 log	[71]
7		<i>sulI</i>	无显著变化	[72]

4 讨论与展望

水环境是抗生素耐药性传播的关键节点,削减污水中的 ARGs 可以有效控制耐药性污染与传播。去除 ARGs 的技术各有优缺点,但总的来说,都没有实现对 ARGs 的完全去除。生物处理作为污水处理厂常规工艺之一,仍然是实际去除 ARGs 的主要方法,但其普遍存在富集现象,进一步加速 ARGs 的产生;化学处理对 ARGs 的去除效果好,但大部分停留在实验室阶段,无法大规模投入使用;物理处理对 ARGs 去效果好,但未实现对 ARGs 的完全去除;消毒能够实现对 ARGs 的间接去除,但大剂量消毒剂才能满足去除需求。对于目前所面临的问题,建议今后研究从以下方面考虑:

(1) 对污泥处理技术、污泥处置方法开展进一步研究,优化现有技术参数。污泥停留时间与 ARGs 去除率呈正相关,可采取增加污泥停留时间、混合液悬浮固体浓度等方式增强对 ARGs 的去除效果。

(2) 开发高效、低剂量的消毒剂用于实际污水处理,多种消毒技术联合使用,如 UV/氯化、UV/臭氧,增强去除效果的同时减小成本投入。

(3) 在处理工艺前段,对抗生素进行控制,如采用微生物降解法、树脂吸附法、电催化氧化法等,减小抗生素选择压,从源头上控制 ARGs 的二次产生。

(4) 运用组合工艺形成优势互补,如膜分离/AOP,膜分离技术对 ARGs 实现了高截留率,AOP 对 ARGs 实现了高降解率,由此,可以获得更高的去除率和更低的二次污染。

(5) 对污水中常见的大环内酯类、磺胺类、喹诺酮类、四环素类等几类 ARGs 进行定期监测,从而评估并预防潜在的风险。

(6) 减少抗生素的使用,如在畜牧业中对抗生素剂量减量等并对影响其传播的物质进行控制,如微生物群落^[73]、重金属^[74]等。

今后,仍应加强对 ARGs 处理技术的研究,关注 ARGs 去除效果的同时关注 ARGs 在水环境中的传播机制、影响因素等,扩大应用规模并开展实际应用研究,与实际工程相结合,真正解决污水中的 ARGs 风险问题。

参考文献:

- [1] YU C, PANG H, WANG J H, et al. Occurrence of antibiotics in waters, removal by microalgae-based systems, and their toxicological effects: A review[J]. Science of the Total Environment, 2022, 813: 151891.

- [2] 张晓娜,许慧芹,汝少国,等.海洋环境中抗生素抗性基因的分布、来源、传播和风险研究[J].生态毒理学报,2023,18(1):174-190.
ZHANG X N, XU H Q, RU S G, et al. Study on distribution, source, propagation and risk of antibiotic resistance genes in marine environment[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2023, 18(1): 174-190(in Chinese).
- [3] FENG L, CHENG Y R, ZHANG Y Y, et al. Distribution and human health risk assessment of antibiotic residues in large-scale drinking water sources in Chongqing area of the Yangtze River[J]. Environmental Research, 2020, 185: 109386.
- [4] WANG J L, CHU L B, WOJNÁROVITS L, et al. Occurrence and fate of antibiotics, antibiotic resistant genes (ARGs) and antibiotic resistant bacteria (ARB) in municipal wastewater treatment plant: An overview[J]. Science of the Total Environment, 2020, 744: 140997.
- [5] PIRES J, SANTOS R, MONTEIRO S. Antibiotic resistance genes in bacteriophages from wastewater treatment plant and hospital wastewaters[J]. Science of the Total Environment, 2023, 892: 164708.
- [6] ELDER F C T, PROCTOR K, BARDEN R, et al. Spatiotemporal profiling of antibiotics and resistance genes in a river catchment: Human population as the main driver of antibiotic and antibiotic resistance gene presence in the environment[J]. Water Research, 2021, 203: 117533.
- [7] 李柏林,张贺,王俊,等.长江武汉段水源地典型抗生素及抗性基因污染特征与生态风险评估[J].环境科学,2023,44(4):2032-2039.
LI B L, ZHANG H, WANG J, et al. Pollution characteristics and risk assessment of antibiotics and resistance genes in different water sources in the Wuhan section of the Yangtze River[J]. Environmental Science, 2023, 44(4): 2032-2039(in Chinese).
- [8] ZHUANG M, ACHMON Y, CAO Y P, et al. Distribution of antibiotic resistance genes in the environment[J]. Environmental Pollution, 2021, 285: 117402.
- [9] PÄRNÄNEN K M M, NARCISO-DA-ROCHA C, KNEIS D, et al. Antibiotic resistance in European wastewater treatment plants mirrors the pattern of clinical antibiotic resistance prevalence[J]. Science Advances, 2019, 5(3): eaau9124.
- [10] YIN X L, YANG Y, DENG Y, et al. An assessment of resistome and mobilome in wastewater treatment plants through temporal and spatial metagenomic analysis[J]. Water Research, 2022, 209: 117885.
- [11] ZHAO J H, LI B, LÜ P, et al. Distribution of antibiotic resistance genes and their association with bacteria and viruses in decentralized sewage treatment facilities[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2021, 16(3): 35.
- [12] GUO X Y, YAN Z, ZHANG Y, et al. Behavior of antibiotic resistance genes under extremely high-level antibiotic selection pressures in pharmaceutical wastewater treatment plants[J]. Science of the Total Environment, 2018, 612: 119-128.
- [13] RUI Y P, QIU G. Analysis of antibiotic resistance genes in water reservoirs and related wastewater from animal farms in Central China[J]. Microorganisms, 2024, 12(2): 396.
- [14] LI J H, REN S J, QIU X, et al. Electroactive ultrafiltration membrane for simultaneous removal of antibiotic, antibiotic resistant bacteria, and antibiotic resistance genes from wastewater effluent[J]. Environmental Science & Technology, 2022, 56(21): 15120-15129.
- [15] KEENUM I, LIGUORI K, CALARCO J, et al. A framework for standardized qPCR-targets and protocols for quantifying antibiotic resistance in surface water, recycled water and wastewater[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2022, 52(24): 4395-4419.
- [16] WANG R M, JI M, ZHAI H Y, et al. Occurrence of antibiotics and antibiotic resistance genes in WWTP effluent-receiving water bodies and reclaimed wastewater treatment plants[J]. Science of the Total Environment, 2021, 796: 148919.
- [17] 苏志国,陈吕军,温东辉.环境耐药组及其健康风险的宏基因组学研究策略和方法[J].微生物学通报,2023,50(4):1538-1558.
SU Z G, CHEN L J, WEN D H. Metagenomic strategies and methods for studying environmental resistome and its health risk[J]. Microbiology China, 2023, 50(4): 1538-1558(in Chinese).
- [18] HENDRIKSEN R S, MUNK P, NJAGE P, et al. Global monitoring of antimicrobial resistance based on metagenomics analyses of urban sewage[J]. Nature Communications, 2019, 10: 1124.
- [19] 苏志国,陈伟东,郑宇涵,等.基于宏基因组学解析不同污水处理系统的耐药基因组分布特征和传播机制[J].生态毒理学报,2023,18(2):1-13.
SU Z G, CHEN W D, ZHENG Y H, et al. Distribution characteristics and transmission mechanism of antibiotic resistome in different wastewater treatment systems based on metagenomic analysis[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2023, 18(2): 1-13(in Chinese).
- [20] 柳林妹,滕彦国,杨光,等.人工湿地去除污水中抗生素及其抗性基因研究进展[J].环境工程,2022,40(12):270-280.
LIU L M, TENG Y G, YANG G, et al. Research progress on removal of antibiotics and antibiotic resistance genes from wastewater by constructed wetlands[J]. Environmental Engi-

- neering, 2022, 40(12): 270–280(in Chinese).
- [21] CHEN J, WEI X D, LIU Y S, et al. Removal of antibiotics and antibiotic resistance genes from domestic sewage by constructed wetlands; Optimization of wetland substrates and hydraulic loading[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 565: 240–248.
- [22] FARIA C V, RICCI B C, SILVA A F R, et al. Removal of micropollutants in domestic wastewater by expanded granular sludge bed membrane bioreactor[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2020, 136: 223–233.
- [23] WANG J L, CHEN X Y. Removal of antibiotic resistance genes (ARGs) in various wastewater treatment processes; An overview[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2022, 52(4): 571–630.
- [24] ZAREI-BAYGI A, HARB M, WANG P, et al. Evaluating antibiotic resistance gene correlations with antibiotic exposure conditions in anaerobic membrane bioreactors[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(7): 3599–3609.
- [25] LI B, QIU Y, LI J, et al. Removal of antibiotic resistance genes in four full-scale membrane bioreactors[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 653: 112–119.
- [26] DONG P Y, CUI Q J, FANG T T, et al. Occurrence of antibiotic resistance genes and bacterial pathogens in water and sediment in urban recreational water[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, 77: 65–74.
- [27] 张金璐. 表面流人工湿地对养殖废水中抗生素和抗性基因去除效应研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2017.
- ZHANG J L. Study on the removal effects of antibiotics and antibiotic resistance genes from aquaculture wastewater by surface flow constructed wetlands[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2017 (in Chinese).
- [28] HUANG X F, YE G Y, YI N K, et al. Effect of plant physiological characteristics on the removal of conventional and emerging pollutants from aquaculture wastewater by constructed wetlands[J]. *Ecological Engineering*, 2019, 135: 45–53.
- [29] LE T H, NG C, TRAN N H, et al. Removal of antibiotic residues, antibiotic resistant bacteria and antibiotic resistance genes in municipal wastewater by membrane bioreactor systems[J]. *Water Research*, 2018, 145: 498–508.
- [30] LI X K, LIU F R, XI S Y, et al. Removal of antibiotics and antibiotic resistance genes in the synthetic oxytetracycline wastewater by UASB–A/O(MBR) process[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, 11(3): 109699.
- [31] KAPPELL A D, KIMBELL L K, SEIB M D, et al. Removal of antibiotic resistance genes in an anaerobic membrane bioreactor treating primary clarifier effluent at 20 °C[J]. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2018, 4(11): 1783–1793.
- [32] WANG S, MA X X, LIU Y L, et al. Fate of antibiotics, antibiotic-resistant bacteria, and cell-free antibiotic-resistant genes in full-scale membrane bioreactor wastewater treatment plants[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 302: 122825.
- [33] WANG F, CHEN Y W, WANG L, et al. Fates of antibiotic resistance genes during upgrading process of a municipal wastewater treatment plant in southwest China[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 437: 135187.
- [34] SHI Q K, DENG S, ZHENG Y L, et al. The application of transition metal-modified biochar in sulfate radical based advanced oxidation processes[J]. *Environmental Research*, 2022, 212: 113340.
- [35] NIHEMAITI M, YOON Y, HE H, et al. Degradation and deactivation of a plasmid-encoded extracellular antibiotic resistance gene during separate and combined exposures to UV254 and radicals[J]. *Water Research*, 2020, 182: 115921.
- [36] 汪涛, 武英欣, 孟令辰, 等. 3 种抗病毒药物在水中的光解动力学[J]. *天津师范大学学报(自然科学版)*, 2023, 43(1): 15–21.
- WANG T, WU Y X, MENG L C, et al. Photolysis kinetics of three antiviral drugs in water[J]. *Journal of Tianjin Normal University (Natural Science Edition)*, 2023, 43(1): 15–21 (in Chinese).
- [37] DAS D, BORDOLOI A, ACHARY M P, et al. Degradation and inactivation of chromosomal and plasmid encoded resistance genes/ARBs and the impact of different matrices on UV and UV/H₂O₂ based advanced oxidation process[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 833: 155205.
- [38] MENG X Q, LI F J, YI L, et al. Free radicals removing extracellular polymeric substances to enhance the degradation of intracellular antibiotic resistance genes in multi-resistant *Pseudomonas Putida* by UV/H₂O₂ and UV/peroxydisulfate disinfection processes[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 430: 128502.
- [39] ZHANG Y Y, ZHUANG Y, GENG J J, et al. Reduction of antibiotic resistance genes in municipal wastewater effluent by advanced oxidation processes[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 550: 184–191.
- [40] LIN R Y, LI Y, YONG T Z, et al. Synergistic effects of oxidation, coagulation and adsorption in the integrated Fenton-based process for wastewater treatment; A review[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 306: 114460.
- [41] GIANNAKIS S, LÓPEZ M I P, SPUHLER D, et al. Solar disinfection is an augmentable, in situ-generated photo-Fenton reaction; Part 2: A review of the applications for drinking water and wastewater disinfection[J]. *Applied Catalysis B: Environ-*

- mental, 2016, 198: 431-446.
- [42] MOREIRA N F F, NARCISO-DA-ROCHA C, POLO-LÓPEZ M I, et al. Solar treatment (H_2O_2 , TiO_2 -P25 and GO - TiO_2 photocatalysis, photo-Fenton) of organic micropollutants, human pathogen indicators, antibiotic resistant bacteria and related genes in urban wastewater[J]. *Water Research*, 2018, 135: 195-206.
- [43] MICHAEL S G, MICHAEL-KORDATOU I, BERETSOU V G, et al. Solar photo-Fenton oxidation followed by adsorption on activated carbon for the minimisation of antibiotic resistance determinants and toxicity present in urban wastewater[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2019, 244: 871-880.
- [44] YU P, ZHOU X Q, LI Z F, et al. Inactivation and change of tetracycline-resistant *Escherichia coli* in secondary effluent by visible light-driven photocatalytic process using $Ag/AgBr/g-C_3N_4$ [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 705: 135639.
- [45] VILELA P B, V M STARLING M C, MENDONÇA NETO R P, et al. Solar photo-Fenton mediated by alternative oxidants for MWWTP effluent quality improvement: Impact on microbial community, priority pathogens and removal of antibiotic-resistant genes[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 441: 136060.
- [46] VILELA P B, MENDONÇA NETO R P, STARLING M C V M, et al. Metagenomic analysis of MWWTP effluent treated via solar photo-Fenton at neutral pH: Effects upon microbial community, priority pathogens, and antibiotic resistance genes[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 801: 149599.
- [47] AHMED Y, ZHONG J X, YUAN Z G, et al. Simultaneous removal of antibiotic resistant bacteria, antibiotic resistance genes, and micropollutants by a modified photo-Fenton process[J]. *Water Research*, 2021, 197: 117075.
- [48] AHMED Y, LU J, YUAN Z G, et al. Efficient inactivation of antibiotic resistant bacteria and antibiotic resistance genes by photo-Fenton process under visible LED light and neutral pH[J]. *Water Research*, 2020, 179: 115878.
- [49] LAN L H, KONG X W, SUN H X, et al. High removal efficiency of antibiotic resistance genes in swine wastewater via nanofiltration and reverse osmosis processes[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 231: 439-445.
- [50] RIQUELME BREAZEAL M V, NOVAK J T, VIKESLAND P J, et al. Effect of wastewater colloids on membrane removal of antibiotic resistance genes[J]. *Water Research*, 2013, 47(1): 130-140.
- [51] LU J, ZHANG Y X, WU J, et al. Fate of antibiotic resistance genes in reclaimed water reuse system with integrated membrane process[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 382: 121025.
- [52] SUN L H, ZHANG M X, DING Y, et al. Nanofiltration to address membrane fouling from antibiotic resistance genes in secondary effluent[J]. *Environmental Engineering Science*, 2023, 40(1): 20-28.
- [53] SUN L H, GAO C, HE N, et al. The removal of antibiotic resistance genes in secondary effluent by the combined process of PAC-UF[J]. *Journal of Environmental Science and Health Part A: Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*, 2019, 54(11): 1075-1082.
- [54] TAN Y X, WEN Q X, LI M, et al. Simultaneous antibiotic resistance genes reduction and membrane fouling mitigation by a hybrid process of magnetic activated carbon adsorption and ultrafiltration for wastewater reuse[J]. *Separation and Purification Technology*, 2022, 303: 122227.
- [55] YANG B X, WEN Q X, CHEN Z Q, et al. Potassium ferrate combined with ultrafiltration for treating secondary effluent: Efficient removal of antibiotic resistance genes and membrane fouling alleviation[J]. *Water Research*, 2022, 217: 118374.
- [56] LIU H, LI Z Q, QIANG Z M, et al. The elimination of cell-associated and non-cell-associated antibiotic resistance genes during membrane filtration processes: A review[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 833: 155250.
- [57] SLIPKO K, REIF D, WÖGERBAUER M, et al. Removal of extracellular free DNA and antibiotic resistance genes from water and wastewater by membranes ranging from microfiltration to reverse osmosis[J]. *Water Research*, 2019, 164: 114916.
- [58] YUAN Q B, YU P F, CHENG Y, et al. Chlorination (but not UV disinfection) generates cell debris that increases extracellular antibiotic resistance gene transfer via proximal adsorption to recipients and upregulated transformation genes[J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(23): 17166-17176.
- [59] 李金梅, 李曦, 张舒婷. 消毒工艺对水体中抗生素抗性基因的去除效果[J]. *净水技术*, 2018, 37(2): 10-16.
- LI J M, LI X, ZHANG S T. Effect of disinfection process on removal of antibiotic resistance genes (ARGs) in water body[J]. *Water Purification Technology*, 2018, 37(2): 10-16(in Chinese).
- [60] STANGE C, SIDHU J P S, TOZE S, et al. Comparative removal of antibiotic resistance genes during chlorination, ozonation, and UV treatment[J]. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 2019, 222(3): 541-548.
- [61] ZHANG M L, CHEN S, YU X, et al. Degradation of extracellular genomic, plasmid DNA and specific antibiotic resistance genes by chlorination[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2019, 13(3): 38.
- [62] LU J, GUO J H. Disinfection spreads antimicrobial resis-

- tance[J]. *Science*, 2021, 371(6528): 474.
- [63] MA L P, YANG H Y, GUAN L, et al. Risks of antibiotic resistance genes and antimicrobial resistance under chlorination disinfection with public health concerns[J]. *Environment International*, 2022, 158: 106978.
- [64] ZHAI H Y, GUO Y J, ZHANG L Y, et al. Presence of bromide and iodide promotes the horizontal transfer of antibiotic resistance genes during chlorination: A preliminary study[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 846: 157250.
- [65] HE H, ZHOU P R, SHIMABUKU K K, et al. Degradation and deactivation of bacterial antibiotic resistance genes during exposure to free chlorine, monochloramine, chlorine dioxide, ozone, ultraviolet light, and hydroxyl radical[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(4): 2013–2026.
- [66] ZHENG J, SU C, ZHOU J W, et al. Effects and mechanisms of ultraviolet, chlorination, and ozone disinfection on antibiotic resistance genes in secondary effluents of municipal wastewater treatment plants[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 317: 309–316.
- [67] ZHENG Q, ZHANG Y Q, QIAN X, et al. Removal of antibiotic resistant bacteria and plasmid-encoded antibiotic resistance genes in water by ozonation and electro-peroxone process[J]. *Chemosphere*, 2023, 319: 138039.
- [68] PHATTARAPATTAMAWONG S, CHAREEWAN N, POLPRASERT C. Comparative removal of two antibiotic resistant bacteria and genes by the simultaneous use of chlorine and UV irradiation (UV/chlorine): Influence of free radicals on gene degradation[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 755: 142696.
- [69] ZHANG Y, GU A Z, HE M, et al. Subinhibitory concentrations of disinfectants promote the horizontal transfer of multidrug resistance genes within and across Genera[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(1): 570–580.
- [70] LAN L H, XIE Y L, KONG X W, et al. Investigation of reduction in risk from antibiotic resistance genes in laboratory wastewater by using O₃, ultrasound, and autoclaving[J]. *Water Environment Research*, 2021, 93(3): 479–486.
- [71] ZHAO M J, ZHOU X Q, LI Z F, et al. The dynamics and removal efficiency of antibiotic resistance genes by UV-LED treatment: An integrated research on single- or dual-wave-length irradiation[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2023, 263: 115212.
- [72] LIU X C, HU J Y. Effect of DNA sizes and reactive oxygen species on degradation of sulphonamide resistance *Sul1* genes by combined UV/free chlorine processes[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 392: 122283.
- [73] TONG J, TANG A P, WANG H Y, et al. Microbial community evolution and fate of antibiotic resistance genes along six different full-scale municipal wastewater treatment processes[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 272: 489–500.
- [74] SUN F L, XU Z T, FAN L L. Response of heavy metal and antibiotic resistance genes and related microorganisms to different heavy metals in activated sludge[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 300: 113754.

本文引文格式:

王亮, 杨翠翠, 莫颖慧, 等. 污水中抗生素抗性基因的分布与去除研究进展[J]. *天津工业大学学报*, 2026, 45(1): 38–46.

WANG L, YANG C C, MO Y H, et al. Research progress on distribution and removal of antibiotic resistance genes in wastewater[J]. *Journal of Tiangong University*, 2026, 45(1): 38–46(in Chinese).

(责任编辑:程晓英)