

污水处理与回用

曹珊, 周长风, 鄂泉杰, 等. AAO+MBR 污水深度处理工艺对典型抗生素的去除[J]. 净水技术, 2026, 45(8): 86-94.

Cao S, Zhou C F, E Q J, et al. Removal of typical antibiotics by AAO+MBR wastewater advanced treatment process[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(8): 86-94.

AAO+MBR 污水深度处理工艺对典型抗生素的去除

曹珊¹, 周长风², 鄂泉杰², 朱冰沁¹, 王子豪², 田振南², 马 磊¹, 刘翠云^{2,*}

(1. 南京水务集团有限公司排水水质监测中心, 江苏南京 210037; 2. 南京工业大学城市建设学院, 江苏南京 211816)

摘 要 【目的】 本文旨在掌握抗生素在污水处理厂不同处理阶段的去除机制及其季节性差异特征。【方法】 本文对某厌氧-缺氧-好氧(AAO)+膜生物反应器(MBR)工艺的污水处理厂不同处理单元取样, 测定了水环境中常见的 10 种抗生素, 以此来探究典型抗生素在污水处理全流程中的分布与去除。【结果】 抗生素去除率沿处理流程逐渐升高, 出水中大部分的去除率在 72% 以上。在二、三级处理单元中鉴别出多种抗生素降解菌, 同时发现二、三级处理单元对抗生素的去除贡献最大。脱水污泥中抗生素均有残留, 大部分去除率在 28%~55%。抗生素的进水含量随季节变化, 喹诺酮类夏季含量高于其他季节, 而四环素类和大环内酯类则在冬季含量更高。【结论】 污水处理工艺的条件和抗生素自身的性质共同决定了抗生素的去除效果。污水中的喹诺酮类和四环素类抗生素一部分被降解菌群降解, 另一部分由于其自身的特性从污水转移至污泥。而喹诺酮类抗生素对光敏感, 因而其在夏季的去除率更高。

关键词 厌氧-缺氧-好氧+膜生物反应器工艺; 抗生素; 去除机制; 微生物群落; 季节性差异

中图分类号: TU992 **文献标志码**: A **文章编号**: 1009-0177(2026)08-0086-09

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.08.009

Removal of Typical Antibiotics by AAO+MBR Wastewater Advanced Treatment Process

Cao Shan¹, Zhou Changfeng², E Quanjie², Zhu Bingqin¹, Wang Zihao², Tian Zhennan², Ma Biao¹, Liu Cuiyun^{2,*}

(1. Drainage Water Quality Monitoring Center, Nanjing Water Group Co., Ltd., Nanjing 210037, China;

2. College of Urban Construction, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

Abstract [Objective] This paper aims to investigate the removal mechanisms of antibiotics at different stages of wastewater treatment and to analyze their seasonal variation characteristics. [Methods] In this paper, samples were taken from different treatment units of a certain anaerobic-anoxic-oxic (AAO) + membrane bioreactor (MBR) process wastewater treatment plant to determine 10 common antibiotics in the water environment, in order to explore the distribution and removal of typical antibiotics throughout the entire wastewater treatment process. [Results] The result showed that the removal rate of most antibiotics increased along the treatment process, and the removal rate of effluent was above 72%. A variety of antibiotic-degrading bacteria were identified in the secondary and tertiary treatment units, and it was found that the secondary and tertiary treatment units contributed the most to the removal of antibiotics. There were antibiotic residues in the dewatered sludge, and the removal rate was mostly 28%–55%. The antibiotics content in influent varied with seasons, and the content of quinolones in summer was higher than that in other seasons, while those of tetracyclines and macrolides were higher in winter. [Conclusion] The conditions of the wastewater treatment process and the properties of antibiotics themselves jointly determine their removal efficiency. Some of the quinolones and tetracyclines antibiotics are degraded by the bacteria, and some are transferred from the wastewater to the sludge due to their own characteristics. Quinolone

[收稿日期] 2025-04-28

[基金项目] 国家自然科学基金(51808285); 国家级大学生创新创业训练计划(202410291061Z)

[作者简介] 曹珊(1988—), 女, 工程师, 主要从事水质检测及污染物控制等工作, E-mail: 254615470@qq.com。

[通信作者] 刘翠云(1978—), 女, 教授, 研究方向为新污染物风险评价及控制, E-mail: yunduobai@126.com。

antibiotics are sensitive to light, so their removal rate is higher in summer.

Keywords AAO+MBR process; removal of antibiotic; microbial community; seasonal differences

抗生素被广泛用于人类和动物的疾病治疗,但由于其代谢率较低,相当一部分被排出机体,通过多种途径进入地表水、土壤、沉积物,甚至地下水^[1]。城市污水处理厂也是抗生素进入环境的重要途径之一,污水中检出抗生素质量浓度多在 $\text{ng/L} \sim \mu\text{g/L}$ 级别,高的也可达到 mg/L 级别^[2]。然而,目前传统污水处理厂针对抗生素等污染物的处理工艺较少,导致出水中部分抗生素质量浓度仍处于 $\mu\text{g/L}$ 的水平^[3-4]。研究^[5]表明,污水处理厂中只有 14.3% 的抗生素能被有效去除,而 51.4% 的抗生素去除率在 30% 以下,仍有大量抗生素随出水排入环境中,长期暴露会对生态环境造成危害^[6]。

生化处理工艺是污水处理厂的核心环节,也被证明能一定程度地去除抗生素^[7]。Liu 等^[8]研究了新疆 3 座污水处理厂[生化处理工艺分别为氧化沟、厌氧-缺氧-好氧(AAO)和 AAO+膜生物反应器(MBR)]中抗生素的迁移转化,发现 AAO+MBR 比 AAO 和氧化沟工艺对抗生素去除效果好,且臭氧消毒比紫外线和氯消毒更能有效去除抗生素。通过比较印度污水处理厂中 4 种工艺对抗生素去除情况,发现上流式厌氧污泥床处理效果最好,其次为厌氧-好氧(AO)工艺和活性污泥法,序批式活性污泥法效果最差^[9]。对传统活性污泥法、MBR 和生物脱氮 3 种工艺对抗生素的去除效果进行对比,发现

MBR 效果最好,传统活性污泥法相对较差^[7]。在生化处理环节,抗生素主要靠污泥吸附和生物降解去除^[7,10]。不同季节下污水处理厂抗生素的含量和去除效果也不同,多数表现为冬季进水含量高于夏季,夏季去除率高于冬季^[11-12]。

AAO 和 MBR 是常用的污水处理工艺,两者的联合对常规污染物均有较好的去除效果,然而,其对抗生素的处理尚缺乏详细的报道。本文选择 1 座采用 AAO+MBR 工艺的污水处理厂,分析了 10 种典型抗生素在处理全流程中的分布与去除效果、季节变化特征及其在不同处理环节中的去除机制。结果可进一步掌握污水处理厂一级、二级和三级处理在去除抗生素中的作用,为进一步改进和优化污水处理厂处理工艺提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 采样方法

该污水处理厂设计处理能力为 15 万 t/d ,处理工艺为多段进水 AAO+MBR,最后采用次氯酸钠消毒。污泥处理采用带式脱水。本试验采集的样品为各工艺段出水及污泥,工艺流程及采样点位置如图 1 所示,图 1 中标注为相应采样点简称,其中 Ds 为脱水后污泥的取样点。分别在 1 月、4 月、8 月和 11 月采集了 4 个季节的样品,每个季节选取不同的日期完整采样 2 次。

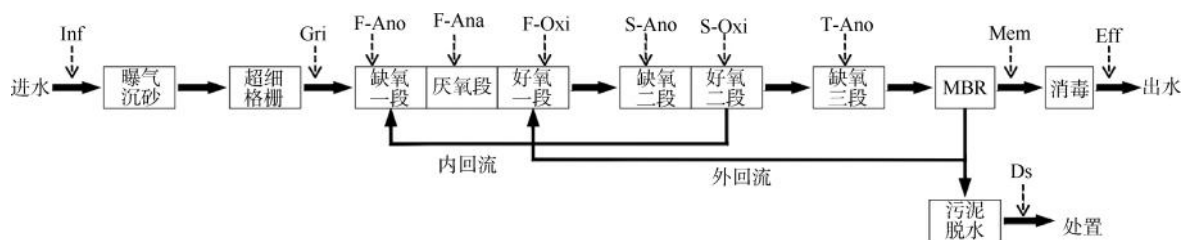


图 1 污水处理厂工艺流程和采样点

Fig. 1 Process Flow and Sampling Point of WWTTP

在每个采样日,从上午 8:00—下午 6:00,每 2 h 取 1 次污水样,然后将多次水样混合为复合样品^[13]。对于污泥样品,用多点取样法采集污泥样品^[14]。为保存样品,向污水样品中加入硫酸调节 pH 值至 2 左右保存,污泥样品则用不透光铝箔袋密封保存。所有样品均置于 4 $^{\circ}\text{C}$ 冷藏保存。

1.2 抗生素含量检测方法

本文共检测了城市污水中较常见的 10 种典型抗生素^[13,15-16],包括:4 种喹诺酮类抗生素(氧氟沙星、诺氟沙星、恩诺沙星、环丙沙星),1 种磺胺类抗生素(磺胺甲恶唑),2 种四环素类抗生素(土霉素、四环素),2 种大环内酯类抗生素(红霉素、罗红霉

素)和1种 β -内酰胺类抗生素(青霉素)。其中,部分抗生素含量过低,在污水和污泥中分别检出7种和8种抗生素。

对污水和污泥样品预处理后,采用高效液相色谱-串联质谱(HPLC-MS/MS)(Agilent 1260)直接进样法对样品进行检测,通过P120EC-C18色谱柱(100 mm $\times$ 3 mm, 2.7 μ m)分离目标化合物。流动相为含0.1%甲酸的高纯水和100%甲醇,质谱采用电喷雾离子化(ESI)、正离子ESI及多重反应检测方式。

1.3 脱氧核糖核酸(DNA)提取及高通量测序

在冬、夏两季取二级处理(AAO)出水(SE)、三级处理(MBR)出水(TE)及剩余污泥(ES)3类样品,借助Illumina MiSeq平台,对样品中的微生物群落进行高通量测序。利用针对515-806(V3-V4)区域的聚合酶链反应(PCR)引物对样品中的16S rRNA基因进行PCR扩增。所有PCR产物在含有溴化乙锭的琼脂糖凝胶[2% Tris-乙酸-EDTA(TAE)缓冲液]上显示,并使用DNA凝胶提取试剂盒纯化(Axygen, 中国)。用QuantiFluor-ST荧光定量系统(Promega, USA)测定每个PCR产物的DNA含量,并根据测序要求适当比例混合。构建PE扩增子库,利用Illumina公司的MiSeq PE300平台进行测序。

2 结果与讨论

2.1 污水处理流程中典型抗生素去除效果

典型抗生素在污水处理厂各处理单元中的去

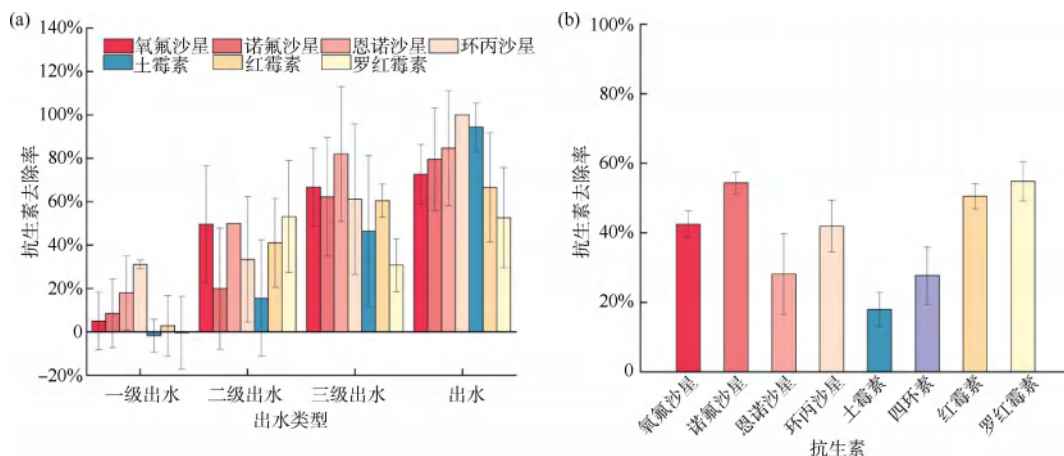


图2 污水处理厂各处理单元对典型抗生素的去除效果

Fig. 2 Removal Effect of Typical Antibiotics in Each Treatment Unit of WWTP

抗生素在不同季节下污水处理流程中的赋存情况如图3所示,喹诺酮类抗生素在夏季的含量普遍高于冬季和春秋季节,其中诺氟沙星和恩诺沙星夏季

除效果如图2(a)所示,一级处理对抗生素的去除率普遍较低,甚至某些抗生素(土霉素和红霉素)的含量有所升高。这些抗生素大多吸附于颗粒物表面,随沉降去除^[17]。二级、三级处理和消毒对抗生素的去除效果明显提高,经过二级和三级处理后,大部分抗生素的去除率分别在33%~53%和46%~82%。而经消毒后,出水中喹诺酮类抗生素和土霉素去除率均在72%以上。另外, β -内酰胺类抗生素未被检出,这主要是由于其稳定性差且易降解^[18]。不同种类的抗生素在污水处理厂的去除效果差异明显,大部分抗生素去除率沿处理流程逐渐升高,而大环内酯类抗生素(红霉素和罗红霉素)去除率普遍较低,这与Sharma等^[19]的研究结果相似。

脱水后污泥中抗生素的去除率如图2(b)所示,不同抗生素的去除效果存在差异,喹诺酮类抗生素(氧氟沙星、诺氟沙星和环丙沙星)和大环内酯类抗生素(红霉素和罗红霉素)的去除率相对较高,为30%~55%,四环素类抗生素(土霉素和四环素)去除率相对较低,为18%~28%。总的来说,CaO污泥调理、带式压滤脱水过程中抗生素的去除率不高,这与抗生素本身特性有较大关系,如喹诺酮类抗生素的固液分配系数 K_d 值较高,易于从水相转移到泥相中^[20];四环素类抗生素易吸附于固体颗粒物表面^[21],这些均使得污泥中仍存在较多抗生素残留。

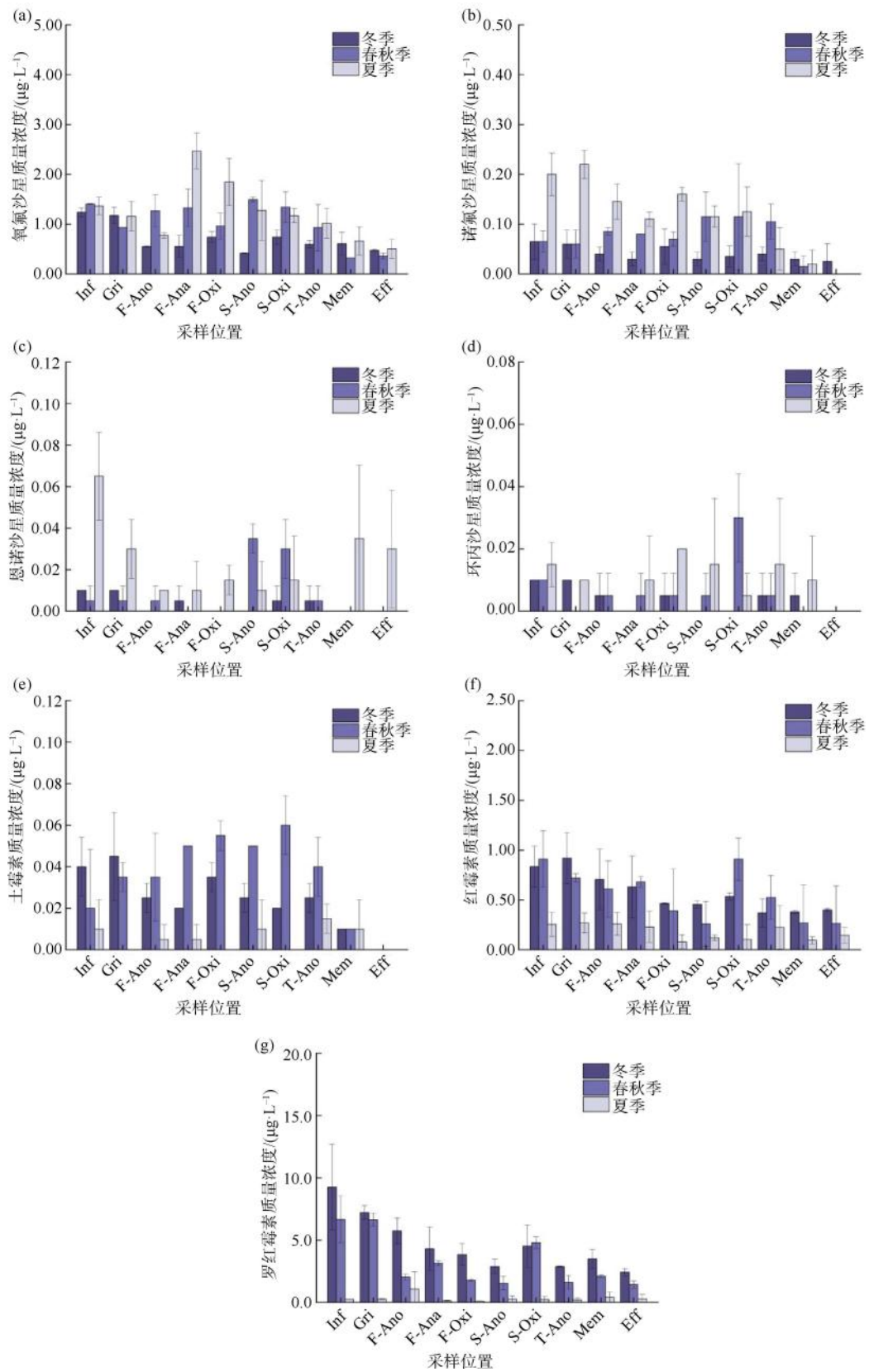


图 3 不同季节污水处理流程中典型抗生素的质量浓度对比

Fig. 3 Comparison of Mass Concentration of Typical Antibiotics in Wastewater Treatment Processes in Different Seasons

的 3~28 倍。冬季和春秋季节是流感高发期,大环内酯类抗生素的使用量较大^[22]。

污水处理流程中抗生素的含量变化差异明显。大部分抗生素含量沿处理流程呈下降趋势,如大环内酯类抗生素经过生化单元处理后,质量浓度降至进水的 1/4。该类抗生素疏水性强,吸附性能较好^[3,10]。另外,生化单元中含有与抗生素降解有关的多种菌群,在 2.2 节中详述。氧氟沙星、诺氟沙星、土霉素等在生化单元中含量有所上升,这与生化单元活性污泥中吸附的抗生素重新释放出来有关^[23]。

2.2 污水处理工艺中冬、夏季微生物群落分析

在属水平上分别比较了冬夏两季生化池出水,三级处理出水及剩余污泥 3 个样品中的微生物群落

(图 4)。生化池出水和剩余污泥中优势菌属相似,而三级出水中优势菌属与其他两个样品中的优势菌属存在较大差异。冬季污水处理厂生化池出水和剩余污泥中主要菌属包括 *norank_f_Saprospiraceae*、*Terrimonas* 和 *unclassified_f_Comamonadaceae*。在三级出水中,最优势的微生物菌属包括 *Pseudarcobacter* (24.64%)、*Undibacterium* (11.93%), 其中 *Pseudarcobacter* 相对丰度较高,而在其他样品中未检出。夏季污水处理厂生化池出水和剩余污泥中主要菌属包括 *Acinetobacter*、*Terrimonas* 和 *norank_f_Saprospiraceae*。在三级出水中,最优势的微生物菌属包括 *Acinetobacter* (5.79%)、*Novosphingobium* (14.03%), 其中 *Novosphingobium* 在三级出水中的相对丰度较高,在其他样品中未检出。

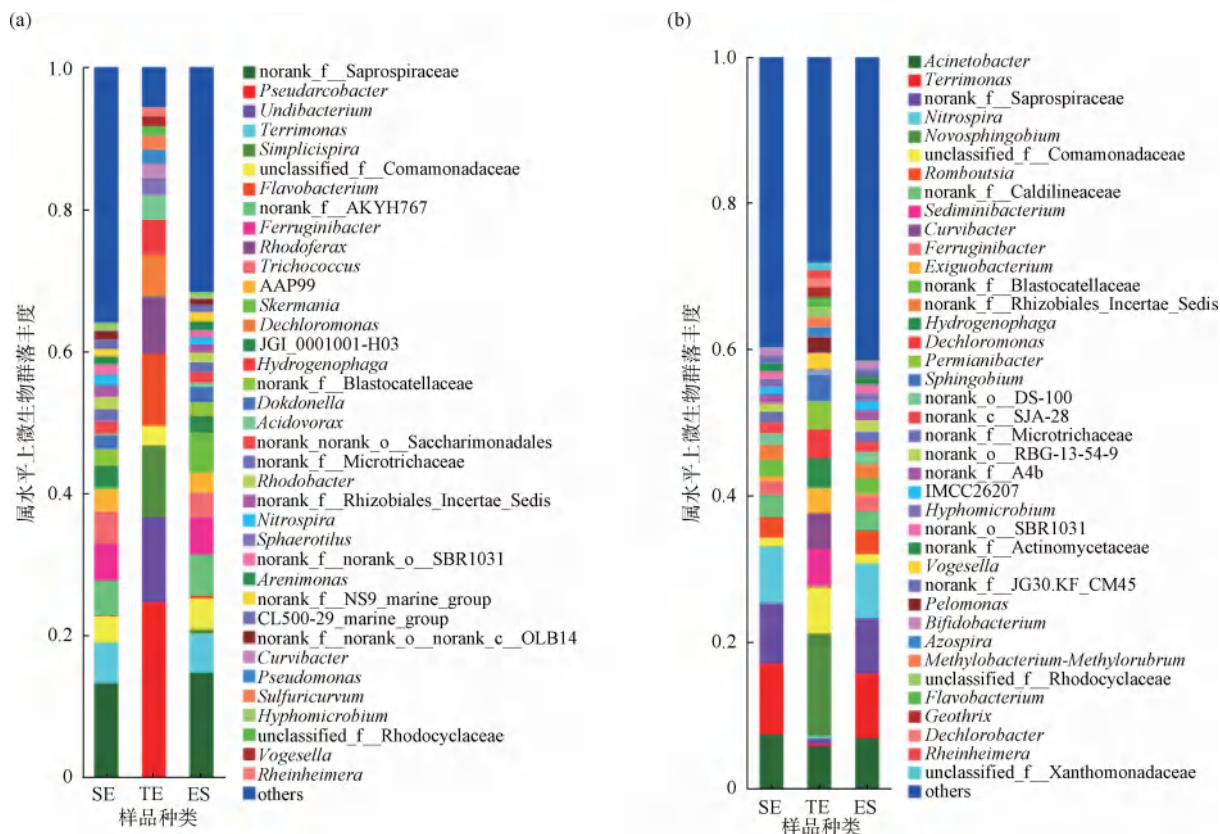
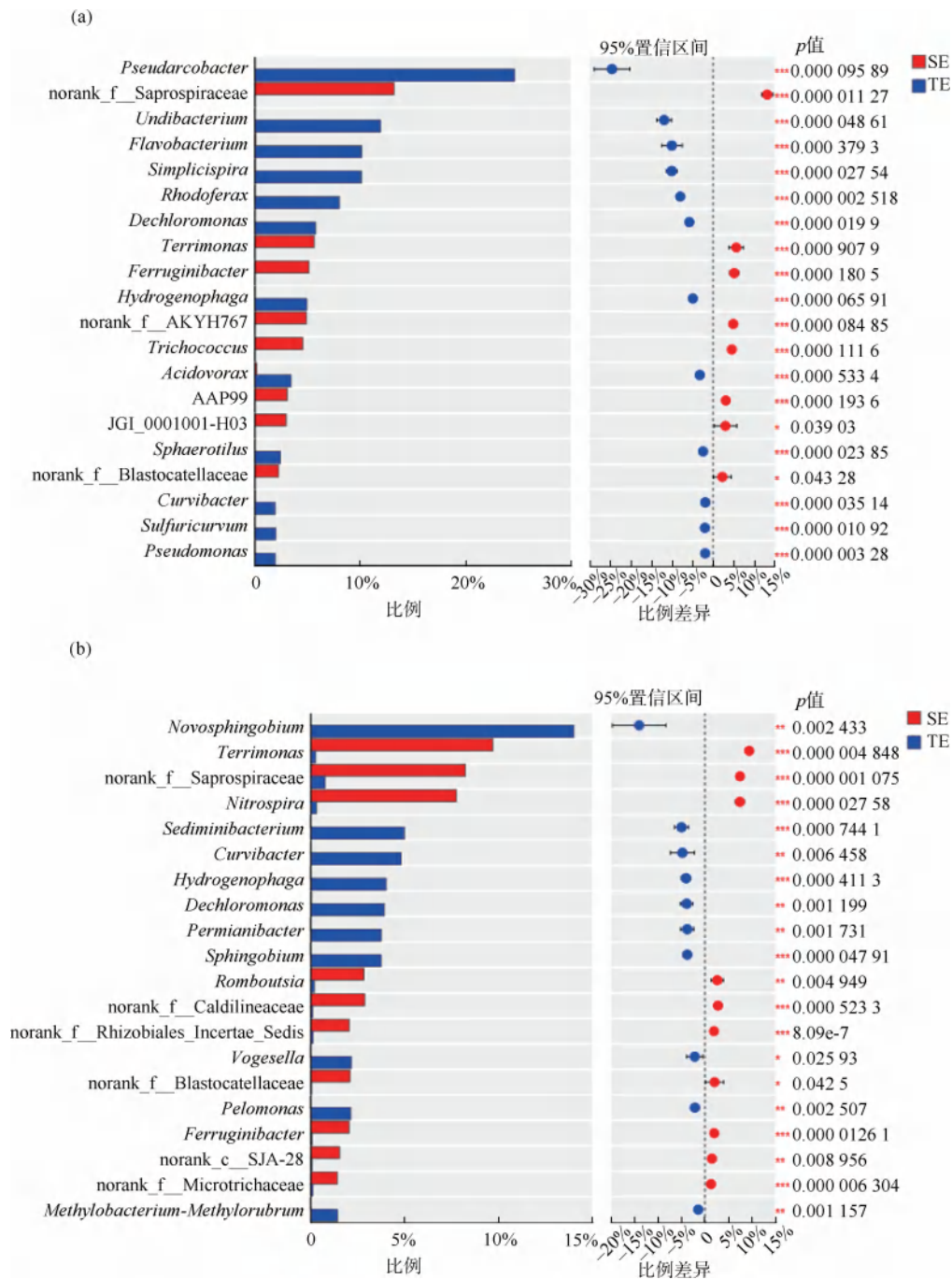


图 4 污水处理厂生化池出水、三级处理出水及剩余污泥中微生物群落组成分析: (a) 冬季; (b) 夏季

Fig. 4 Microbial Community Structure Analysis in Effluent from Biochemical Pond, Tertiary Treatment Effluent and Excess Sludge of WWTP: (a) Winter; (b) Summer

利用 t 检验统计,在属水平比较了冬夏两季生化池出水和三级处理出水两个样品中的微生物群落(图 5)。两季节生化池出水中 *norank_f_Saprospiraceae*、*Terrimonas*、*Ferruginibacter* 的相对丰

度显著高于三级处理出水($p \leq 0.01$),三级处理出水中 *Hydrogenophaga*、*Dechloromonas* 的相对丰度显著高于生化池出水($p \leq 0.01$)。其中 *Hydrogenophaga* 有助于四环素类抗生素的降解^[24],



注：“*”表示 $0.01 < p \leq 0.05$ ，“**”表示 $0.001 < p \leq 0.01$ ，“***”表示 $p \leq 0.001$ 。

图5 污水处理厂生化池和三级处理出水微生物群落结构在属水平上相对丰度的统计比较：
(a) 冬季；(b) 夏季

Fig. 5 Statistical Comparison of Relative Abundance of Microbial Community Structure at the Genus Level between Biochemical Pond and Tertiary Treatment Effluent of WWTP: (a) Winter; (b) Summer

Dechloromonas 属于厌氧降解菌,有助于喹诺酮类抗生素的降解^[25-26]。*Terrimonas*、*Ferruginibacter* 是1种潜在的抗性菌,其有助于抗生素的降解^[27-28]。冬季三级处理出水中,*Undibacterium*、*Flavobacterium*、

Simplicispira 的相对丰度显著高于生化池出水。夏季三级处理出水中 *Novosphingobium*、*Sediminibacterium* 的相对丰度显著高于生化池出水($p \leq 0.01$)。其中 *Flavobacterium*、*Simplicispira*、*Sediminibacterium* 与抗

生素的降解有关^[25,29]。而 *Curvibacter*、*Pseudarcobacter* 是机会性病原体,属于抗性菌^[30-31],在污水处理厂中丰度较高。

2.3 AAO+MBR 污水深度处理工艺降解抗生素的机制

对比污水处理厂各处理单元中典型抗生素的去除率,发现不同处理单元去除效果有明显差异,二级、三级处理对抗生素的去除贡献更大(图2)。研究^[27-28]发现,污水处理厂去除抗生素主要机制是吸附和生物降解。二级处理中除了活性污泥的吸附作用外,其中的优势菌属 *Terrimonas*、*Ferruginibacter* 等(图5)能有效降解抗生素。三级处理中,MBR 膜表面能够有效地截留有机污染物^[10],并且 MBR 生物量高^[32],其中优势菌属 *Hydrogenophaga*、*Dechloromonas* 等的相对丰度显著增大(图5),这两种菌属分别有助于喹诺酮类和四环素类抗生素的降解^[24-25],因此,喹诺酮类抗生素和土霉素的去除率,由二级的 20%~50% 和 16% 分别增大到三级的 61%~82% 和 46%[图2(a)]。然而需要注意的是,喹诺酮类和四环素类抗生素本身具有易于从水相转移至泥相的特性^[20],其一部分并未真正降解去除,而是从污水转移至污泥[图2(b)]。

不同季节抗生素在污水处理厂的去除效果有所不同,一方面不同季节下进水抗生素含量不同时,微生物群落也有差异^[33]。夏季污水处理厂生化池出水中 *Terrimonas* 相对丰度较高,三级处理出水中 *Novosphingobium*、*Sediminibacterium* 等菌属相对丰度显著增大[图5(b)];冬季污水处理厂生化池出水中、*norank_f__Saprospiraceae*、*Terrimonas* 相对丰度较高,三级处理出水中 *Pseudarcobacter*、*Flavobacterium* 等菌属相对丰度显著增大[图5(a)],其中 *Terrimonas*、*Novosphingobium*、*Flavobacterium* 等菌属均有助于抗生素降解。冬季四环素和大环内酯类抗生素的去除效果略好于夏季(图3),冬季反硝化菌 *norank_f__Saprospiraceae*、*Terrimonas* 相对丰度较高[图5(a)],有助于大环内酯类抗生素的降解^[7,34]。另一方面,抗生素本身特性的差异也会影响其降解,比如喹诺酮类、四环素类和磺胺类抗生素对光敏感,容易发生光解^[35],因此夏季喹诺酮类抗生素去除效果略好于冬季(图3),且土霉素含量较低,四环素和磺胺甲恶唑未检出。

3 结论

AAO+MBR 污水深度处理工艺中,大部分抗生素去除率沿处理流程逐渐升高,出水中喹诺酮类抗生素和土霉素去除率均在 72% 以上,但大环内酯类抗生素去除率在 53%~66%。其中,二级处理和三级处理单元对抗生素的去除贡献更大,经二级、三级处理后抗生素的去除率分别达到了 33%~53% 和 46%~82%。脱水后污泥中抗生素的残留不容忽视,抗生素去除率为 28%~55%。不同季节下抗生素的进水含量有明显不同,喹诺酮类抗生素夏季进水含量普遍高于冬季和春秋季节,四环素类和大环内酯类抗生素则相反。微生物群落在抗生素去除过程中起重要作用,AAO 和 MBR 单元中的优势菌属 *Terrimonas*、*Ferruginibacter*、*Novosphingobium* 等能有效降解抗生素,特别是 MBR 单元中的 *Hydrogenophaga*、*Dechloromonas* 等分别有助于喹诺酮类和四环素类抗生素的降解。另外,抗生素自身的性质也影响到其去除效果,喹诺酮类和四环素类抗生素一部分被上述菌群降解,另一部分从污水转移至污泥;喹诺酮类、四环素类和磺胺类等抗生素容易发生光解,四环素类和磺胺类抗生素含量较低甚至未检出,夏季喹诺酮类的去除率更高,均与此有一定关系。根据研究中发现的典型抗生素在污水处理厂各级处理单元中的去除差异及机制,建议传统污水处理厂在提升抗生素等新污染物去除的工艺优化升级上,一方面可强化生物降解,另一方面可增设高级氧化工艺,以解决不同类别抗生素存在的生物降解差异性,以及不同季节进水中抗生素含量差异较大等问题。

参考文献

- [1] 刘芸,王宇航,孔美焰,等. 邕江流域水体和沉积物中抗生素污染特征及生态风险评估[J]. 环境科学, 2025, 46(6): 3371-3381.
Liu Y, Wang Y H, Kong M Y, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of antibiotics in water and sediments of the Yongjiang River Basin [J]. Environmental Science, 2025, 46(6): 3371-3381.
- [2] Akhter S, Bhat M A, Ahmed S, et al. Antibiotic residue contamination in the aquatic environment, sources and associated potential health risks [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2024, 46(10): 387. DOI: 10.1007/s10653-024-02146-5.

- [3] 王凡, 武亚林, 徐井旭, 等. 北京市污水处理厂出水中典型抗生素药物的浓度水平[J]. 环境科学, 2025, 46(4): 1-13.
Wang F, Wu Y L, Xu J X, et al. Concentration levels of typical antibiotic pharmaceuticals in effluent from wastewater treatment plants in Beijing[J]. Environmental Science, 2025, 46(4): 1-13.
- [4] 李兆基. 徐州城市污水处理系统中抗生素污染特征及风险评价[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
Li Z J. Characteristics and risk assessment of antibiotic pollution in the urban wastewater treatment system of Xuzhou City [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [5] Liu H Q, Lam J C W, Li W W, et al. Spatial distribution and removal performance of pharmaceuticals in municipal wastewater treatment plants in China[J]. Science of the Total Environment, 2017, 586: 1162-1169. DOI:10.1016/j.scitotenv.2017.02.107.
- [6] 韩迁, 张玉娇, 赖承钺, 等. 成都市河流中四环素、喹诺酮类抗生素污染特征及生态风险评价[J]. 生态环境学报, 2023, 32(11): 1922-1932.
Han Q, Zhang Y J, Lai C Y, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of tetracycline and quinolone antibiotics in rivers of Chengdu [J]. Journal of Ecology and Environment, 2023, 32(11): 1922-1932.
- [7] 张翔宇, 李茹莹, 季民. 污水生物处理中抗生素的去除机制及影响因素[J]. 环境科学, 2018, 39(11): 5276-5288.
Zhang X Y, Li R Y, Ji M. Removal mechanisms and influencing factors of antibiotics in biological wastewater treatment [J]. Environmental Science, 2018, 39(11): 5276-5288.
- [8] Liu J, Lu J J, Tong Y B, et al. Occurrence and elimination of antibiotics in three sewage treatment plants with different treatment technologies in Urumqi and Shihezi, Xinjiang [J]. Water Science and Technology, 2017, 75(6): 1474-1484.
- [9] Dubey M, Vellanki B P, Ahmad Kazmi A. Removal of emerging contaminants in conventional and advanced biological wastewater treatment plants in India-a comparison of treatment technologies [J]. Environmental Research, 2023, 218: 115012. DOI:10.1016/j.envres.2022.115012.
- [10] 王玉玺, 丁笑寒, 王烁阳, 等. 抗生素在城市污水处理过程中的去除研究进展[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(5): 135-142.
Wang Y X, Ding X H, Wang S Y, et al. Research progress on antibiotic removal in urban wastewater treatment processes[J]. Environmental Science and Technology, 2019, 42(5): 135-142.
- [11] 范迎迎. 东北典型城市污水处理系统中抗生素的残留特征研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
Fan Y Y. Residual characteristics of antibiotics in typical urban wastewater treatment systems in Northeast China [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2023.
- [12] Wu M H, Que C J, Tang L, et al. Distribution, fate, and risk assessment of antibiotics in five wastewater treatment plants in Shanghai, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(18): 18055-18063.
- [13] 陈瑀. 南京市某污水处理厂及受纳水体中抗生素抗性基因赋存特征研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2021.
Chen Y. Occurrence characteristics of antibiotic resistance genes in a wastewater treatment plant and receiving water body in Nanjing [D]. Guiyang: Guizhou University, 2021.
- [14] 段然. 哈尔滨市污水厂中抗生素抗性基因分布及强化去除研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
Duan R. Distribution and enhanced removal of antibiotic resistance genes in wastewater treatment plants in Harbin [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [15] 张慧. 济南某污水处理厂中抗生素的污染特征及风险评估 [D]. 济南: 山东大学, 2023.
Zhang H. Pollution characteristics and risk assessment of antibiotics in a wastewater treatment plant in Jinan [D]. Jinan: Shandong University, 2023.
- [16] Li L T, He J X, Gan Z W, et al. Occurrence and fate of antibiotics and heavy metals in sewage treatment plants and risk assessment of reclaimed water in Chengdu, China [J]. Chemosphere, 2021, 272: 129730. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.129730.
- [17] 刘玉学, 李彭, 王拯. 我国污水处理厂中典型抗生素的分布及处理研究[J]. 中国给水排水, 2023, 39(10): 23-30.
Liu Y X, Li P, Wang Z. Distribution and treatment of typical antibiotics in wastewater treatment plants in China [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(10): 23-30.
- [18] 李清雪, 刘含雨, 刘娟, 等. 邯郸市两座污水处理厂中磺胺类和 β -内酰胺类抗生素迁移转化特征[J]. 环境化学, 2018, 37(8): 1738-1745.
Li Q X, Liu H Y, Liu J, et al. Migration and transformation characteristics of sulfonamide and β -lactam antibiotics in two wastewater treatment plants in Handan [J]. Environmental Chemistry, 2018, 37(8): 1738-1745.
- [19] Sharma B M, Bečanová J, Scheringer M, et al. Health and ecological risk assessment of emerging contaminants (pharmaceuticals, personal care products, and artificial sweeteners) in surface and groundwater (drinking water) in the Ganges River Basin, India [J]. Science of the Total Environment, 2019, 646: 1459-1467. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.235.
- [20] 周佳虹. 天津市城镇污水处理厂污泥中典型抗生素的分布迁移[D]. 天津: 天津大学, 2017.
Zhou J H. Distribution and migration of typical antibiotics in sludge from municipal wastewater treatment plants in Tianjin [D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.

- [21] Chen C X, Aris A, Yong E L, et al. A review of antibiotic removal from domestic wastewater using the activated sludge process: Removal routes, kinetics and operational parameters [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29 (4): 4787–4802.
- [22] 杨妍, 王子宇, 葛林科, 等. 我国水体中大环内酯类抗生素的分布特征及环境光化学行为[J]. *环境化学*, 2024, 43 (3): 734–750.
Yang Y, Wang Z Y, Ge L K, et al. Distribution characteristics and environmental photochemical behavior of macrolide antibiotics in Chinese aquatic environments[J]. *Environmental Chemistry*, 2024, 43(3): 734–750.
- [23] Barbosa M O, Moreira N F F, Ribeiro A R, et al. Occurrence and removal of organic micropollutants: An overview of the watch list of EU Decision 2015/495[J]. *Water Research*, 2016, 94: 257–279. DOI:10.1016/j.watres.2016.02.047.
- [24] 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.
- [25] Sun W J, Zheng Z. Degradation of fluoroquinolones in rural domestic wastewater by vertical flow constructed wetlands and ecological risks assessment[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 398: 136629. DOI:10.1016/j.jclepro.2023.136629.
- [26] Yang C W, Liu C E, Chang B V. Biodegradation of amoxicillin, tetracyclines and sulfonamides in wastewater sludge[J]. *Water*, 2020, 12(8): 2147. DOI: 10.3390/w12082147.
- [27] Abudurehman M, Ailijiang N, Mamat A, et al. Enhanced biodegradation of fluoroquinolones and the changes of bacterial communities and antibiotic-resistant genes under intermittent electrical stimulation[J]. *Environmental Research*, 2023, 219: 115127. DOI:10.1016/j.envres.2022.115127.
- [28] Tang Z Q, Liu H, Wang Y X, et al. Impacts of cefalexin on nitrite accumulation, antibiotic degradation, and microbial community structure in nitrification systems [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 478: 135430. DOI:10.1016/j.jhazmat.2024.135430.
- [29] Xie Y, Wang P B, Li P, et al. Co-degradation of ofloxacin and its impact on solid phase denitrification with polycaprolactone as carbon source [J]. *Bioresource Technology*, 2022, 350: 126938. DOI:10.1016/j.biortech.2022.126938.
- [30] Xu M, Gao P, Chen H Q, et al. Metagenomic insight into the prevalence and driving forces of antibiotic resistance genes in the whole process of three full-scale wastewater treatment plants[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 344: 118369. DOI:10.1016/j.jenvman.2023.118369.
- [31] Švarcová K, Pejchalová M, Šilha D. The effect of antibiotics on planktonic cells and biofilm formation ability of collected *arcobacter*-like strains and strains isolated within the Czech republic[J]. *Antibiotics*, 2022, 11(1): 87. DOI: 10.3390/antibiotics11010087.
- [32] 安佳. 膜生物反应器(MBR)处理大环内酯类抗生素废水的试验研究[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2022.
An J. Experimental study on treatment of macrolide antibiotics wastewater by membrane bioreactor (MBR) [D]. Shenyang: Liaoning University, 2022.
- [33] 贺赞, 李魁晓, 王佳伟, 等. 不同季节城市污水处理厂微生物群落特性[J]. *环境科学*, 2021, 42(3): 1488–1495.
He Y, Li K X, Wang J W, et al. Microbial community characteristics in urban wastewater treatment plants across different seasons [J]. *Environmental Science*, 2021, 42(3): 1488–1495.
- [34] Zhang M, Tan Y F, Fan Y J, et al. Nitrite accumulation, denitrification kinetic and microbial evolution in the partial denitrification process: The combined effects of carbon source and nitrate concentration[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 361: 127604. DOI:10.1016/j.biortech.2022.127604.
- [35] Bueno I, He H, Kinsley A C, et al. Biodegradation, photolysis, and sorption of antibiotics in aquatic environments: A scoping review [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 897: 165301. DOI:10.1016/j.scitotenv.2023.165301.