

分析测试

活性污泥呼吸速率法测定和评估丁苯橡胶污水生物毒性

荆钰¹, 郭廷雪¹, 王永亨², 刘彦平², 孙子茹², 林子昕¹, 别海燕¹, 安维中^{1*}

(1. 中国海洋大学化学化工学院, 山东 青岛 266100;

2. 中国石油兰州石化公司橡胶运行部, 甘肃 兰州 730060)

摘要: 针对丁苯橡胶污水综合治理过程中涉及的污水毒性问题, 开展了基于活性污泥呼吸速率法的污水毒性测定和评价研究。首先, 测定了不同浓度梯度下丁苯橡胶污水对活性污泥的呼吸抑制率和生物毒性, 结果表明, 丁苯橡胶污水对活性污泥呼吸速率抑制率达到 52.69%, 对硝化菌呼吸作用的抑制率达到 99.88%, 3 h-EC₅₀ 值为 76.89%, TU 为 1.30, 生物毒性等级为中毒。其次, 采用气相色谱-质谱联用技术, 对污水中有机物进行了检测, 筛选出丰度较高且具有代表性的 10 种物质, 将其作为引起污水毒性来源的考察物。最后, 对筛选的物质进行了活性污泥呼吸抑制实验, 取得相应的呼吸抑制率、3 h-EC₅₀ 及对活性污泥致毒性的浓度阈值。结果表明, 筛选的物质中 2,6-二异丙基苯酚、4-叔丁基苯磺酰胺、苯乙酮、苯甲醛、2-乙基己醇和邻苯二甲酸二异丁酯活性污泥活性具有明显抑制性, 而 2,4-二叔丁基苯酚、苯乙烯、棕榈酸和八甲基环四硅氧烷的抑制作用不明显。

关键词: 丁苯橡胶; 橡胶污水; 活性污泥呼吸速率; 毒性评估

中图分类号: X703

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2025)11-0256-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.11.044

Detection and evaluation of biological toxicity of styrene-butadiene rubber wastewater based on activated sludge respirometry method

JING Yu¹, GUO Ting-xue¹, WANG Yong-heng², LIU Yan-ping², SUN Zi-ru², LIN Zi-xin¹, BIE Hai-yan¹, AN Wei-zhong^{1*}

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2. Rubber Operation Division, PetroChina Lanzhou Petroleum Company, Lanzhou 730060, China)

Abstract: Aiming at the toxicity associated with the comprehensive management of styrene-butadiene rubber (SBR) wastewater, the toxicity measurement and evaluation based on activated sludge respiration rate method are studied. Firstly, the respiratory inhibition rate and biotoxicity of SBR wastewater on activated sludge are determined at different concentration gradients. The results indicate that the inhibition rate of SBR wastewater on the respiration speed of activated sludge reaches 52.69%, and that on the respiration action of nitrifying bacteria reaches 99.88%. The 3h-EC₅₀ value is 76.89%, TU is 1.30, and the biotoxicity level represents poisoning. Secondly, the gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) technique is employed to detect organics in the wastewater, and 10 kinds of substances with high abundance and representativeness are selected out as the investigated substances for identifying the sources of wastewater toxicity. Finally, the activated sludge respiratory inhibition test is conducted on the selected substances to obtain the corresponding respiratory inhibition rate, 3h-EC₅₀ and concentration thresholds for poisoning activated sludge. It is indicated that among the selected substances, 2,6-diisopropylphenol, 4-tert-butylbenzenesulfonamide, acetophenone, benzaldehyde, 2-ethylhexanol, and diisobutyl phthalate exhibit significant inhibitory effects on the activity of activated sludge, while 2,4-di-tert-butylphenol, styrene, palmitic acid, and octamethyl cyclotetrasiloxane have not significant inhibitory effects.

Key words: styrene-butadiene rubber; rubber wastewater; activated sludge respiration rate; toxicity assessment

丁苯橡胶是由丁二烯和苯乙烯单体聚合制得的无规共聚物^[1], 广泛应用于多领域。在丁苯橡胶合成过程中产生大量污水, 具有水质复杂且难处理的特点^[2-3]。另外, 此污水具有生物毒性, 如果有毒污染物进入污水处理厂生化处理系统, 会抑制和毒害活性污泥微生物的生存, 对污水处理厂的正常运行

构成威胁^[4-5]。因此, 测定、了解和科学评价污水对污水处理厂活性污泥的毒性影响, 对研究开发废水生物毒性监测预警技术, 最大限度减低有毒物质对污水处理厂的冲击, 实现废水有毒物质全过程控制和环境保护等具有重要意义。

目前, 工业废水的毒性检测主要包括理化分析

收稿日期: 2025-01-10; 修回日期: 2025-09-10

作者简介: 荆钰 (2000-), 女, 硕士生; 安维中 (1968-), 男, 博士, 教授, 研究方向为化工过程系统工程, 通讯联系人, awzhong@ouc.edu.cn。

法和生物检测法^[6]。理化分析法的指标包括氨氮、化学需氧量(COD)、生物需氧量(BOD)等常规水质指标,不能完全直接、准确和全面地反映出污水对污水厂生化处理单元的冲击及排放到自然环境中生物的综合毒性大小^[7-8]。相比之下,生物检测法不仅能评价工业污水中未知的有毒有害污染物对生物的影响,又能够在一定程度上反映污水的污染情况和污染物的综合毒性,同时直接揭示污染物含量与其生物效应之间的关系^[9-10]。当前,活性污泥呼吸抑制实验作为一种典型的微生物检测手段,采用生化处理系统中的活性污泥作为受试微生物,通过测定实验混合液中溶解氧含量随时间的变化及污泥呼吸速率受抑制情况,进而对生物毒性进行评估^[11-13]。许多学者已利用该方法研究污水及化学品的生物毒性,如罗梦等^[14]测定了石化废水处理过程中活性污泥呼吸速率的抑制效应,结果表明,经各级工艺处理后,废水对污泥中硝化菌呼吸速率抑制率由60%降至30%;Cristóvão等^[15]评估了NaCl对罐头废水生物降解的影响,结果显示,当NaCl质量浓度大于17.5 g/L时,污泥微生物的呼吸速率会受到抑制;鞠晨曦等^[16]则考察了Hg²⁺、Cd²⁺、Cr⁶⁺及Cu²⁺4种重金属离子对活性污泥的抑制作用,结果表明这些重金属离子对污泥微生物呼吸速率均有明显抑制。需要说明,尽管活性污泥呼吸抑制实验的应用领域非常广,但未查阅到应用于丁苯橡胶污水生物毒性检测的研究报道。

本文中针对国内某企业丁苯橡胶污水综合治理的需要,开展基于活性污泥呼吸速率法的污水生物毒性检测和评估研究,以期为污水的综合治理和水质监控等提供理论和技术支持。

1 材料与方法

1.1 实验水样与活性污泥

本研究污水取自某石化企业丁苯橡胶污水排放口。活性污泥取自某石化企业的污水处理厂曝气池出口,污泥参数主要为MLSS 5.84×10^3 mg/L, MLVSS 2.95×10^3 mg/L, SV₃₀ 28%。实验之前,参照国标 GB/T 21796—2022《化学品 活性污泥呼吸抑制试验》方法^[17],将活性污泥悬浮液进行清洗、静置和沉淀处理,弃去上清液,用曝气除氯的自来水清洗3次。处理好的活性污泥通过去除液体调整为浓度15 000 mg/L的接种液,并在4℃保存,保存时间不超过3 d。使用前将接种液经持续曝气恢复至室温待用。

1.2 水质检测方法及仪器

为了全面了解污水的水质特点和追溯导致生物毒性的原因,开展了污水水质分析和检测工作。其一是开展常规水质分析,包括pH、电导率、化学需氧量(COD)、生物需氧量(BOD)、氨氮等,其二是对污水中的有机物进行气相色谱-质谱(GC/MS)定性检测。

本文中GC/MS检测采用的方法为顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用法,所用仪器为Agilent 7980A气相色谱仪,5975C质谱仪,PAL System三合一进样器(瑞士CTC公司)。质谱条件设置为:EI电离源,能量70 eV;离子源温度230℃,四极杆温度150℃,接口温度250℃,扫描范围30~400 m/z,扫描时间50 min。建立的GC/MS检测条件为:HP-INNOWAX毛细管柱子(30 m×0.25 mm×0.25 μm)作为色谱柱,He载气,流速1 mL/min,分离比5:1;进样温度250℃;升温程序需按照起始温度为40℃,保持5 min,然后以8℃/min升至250℃,再保持5 min。

1.3 活性污泥呼吸抑制实验

1.3.1 实验采用标准及仪器

研究采用2022年最新发布的国家标准 GB/T 21796—2022《化学品 活性污泥呼吸抑制试验》^[17],研究采用的主要仪器设备包括JPB-607A便携式溶解氧分析仪、XH-BOD5曝气装置、DF-101S集热式恒温加热磁力搅拌器、PHS-25 pH计、DHG-9070A电热恒温鼓风干燥箱、DRZ-4马弗炉。

1.3.2 实验试剂及配制

(1)营养液:按照国标 GB/T 21796—2022^[15]配制,分别称取16.00 g 蛋白胍、11.00 g 牛肉膏、3.00 g 尿素、0.70 g NaCl、0.40 g CaCl₂·2H₂O、0.20 g MgSO₄·7H₂O和2.80 g K₂HPO₄,用蒸馏水溶解,定容到1 L。

(2)参比毒物溶液:采用3,5-二氯苯酚(3,5-DCP)作为参比毒物。配制1.00 g/L 3,5-DCP参比物溶液,使用时配制浓度分别为0、1、3、9、27、81 mg/L的实验混合液进行活性污泥呼吸速率敏感性实验。

(3)硝化作用抑制剂混合液:使用N-烯丙基硫脲(ATU)作为硝化细菌抑制剂。称取2.32 g ATU,用蒸馏水溶解,定容到1 L,即按ATU浓度为11.6 mg/L配制硝化作用抑制剂混合液,用于测定活性污泥硝化细菌的存在性。

1.3.3 实验方法

实验混合液体系为 500 mL, 其中污泥悬浮液 50 mL, 营养液 16 mL, 按照浓度梯度添加污水或受试有机物, 测定异养菌呼吸速率时添加 ATU 混合液 2.5 mL, 最后用去离子水定容。此外, 每次样品测定的同时, 设置不含污水和受试有机物的空白对照。正式实验之前, 通过不投加污泥的非生物对照确定污水和受试有机物本身不具有耗氧特性。

活性污泥呼吸抑制实验按国标 GB/T 21796—2022^[17] 进行, 主要步骤为: 将装有实验混合液的烧杯放在在 20℃ 的水浴中, 搅拌并剧烈曝气 3 h, 每个烧杯开始曝气的时间间隔为 25 min; 曝气 3 h 结束后, 将实验混合液转移到完全充满的溶解氧瓶中, 打开磁力搅拌使污泥絮状物处于悬浮状态, 将氧电极插入瓶颈处, 连续测定溶解氧浓度并记录, 直到溶解氧浓度降到 2.0 mg/L 以下。

1.3.4 数据处理

通过实验测得不同时间的溶解氧数据, 利用 Origin 软件对数据进行线性回归, 得到耗氧速率 R_0 。活性污泥呼吸速率 R 和抑制率 I 计算式分别为式(1)和式(2):

$$R = R_0/SS \quad (1)$$

$$I = (1 - R/R_B) \times 100\% \quad (2)$$

式中, R 为活性污泥呼吸速率, $\text{mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$; R_0 为活性污泥耗氧速率, $\text{mg}/(\text{L} \cdot \text{h})$; SS 为实验混合液中污泥浓度, g/L ; I 为活性污泥呼吸速率抑制率, %; R_B 为空白对照组的呼吸速率, $\text{mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 。

活性呼吸抑制毒性用 3 h- EC_{50} (半数效应浓度) 表示, 采用文献[18]方法, 通过 Origin 软件对活性污泥呼吸抑制率与污水或受试物浓度进行指数拟合得到相关方程, 进而计算污水及受试物的 3 h- EC_{50} 。方程表达式为式(3):

$$y = a + be^{cx} \quad (3)$$

式中, 因变量 y 为活性污泥呼吸速率抑制率, %; 自变量 x 为污水浓度(%)或受试物浓度(mg/L); a 、 b 、 c 为函数参数。

2 活性污泥呼吸抑制实验测定结果

2.1 硝化细菌存在性及活性污泥敏感性检验结果

以 ATU 作为硝化作用抑制剂, 按国标方法^[17] 通过实验测得活性污泥的总呼吸速率 R_{TB} 为 $25.06 \pm 0.34 \text{ mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$, 大于 GB/T 21796—2022 标准质控要求的 $20 \text{ mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$, 表明采集的活性污泥活性较高, 能满足质量控制的要求。同样, 测得异养菌呼吸

速率 R_{HB} 和硝化菌呼吸速率 R_{NB} , 分别为 18.37 ± 0.77 、 $6.69 \pm 0.60 \text{ mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$, 采集的活性污泥中含有硝化细菌, 可用于硝化菌呼吸速率实验的抑制效应分析。以 3,5-DCP 为参比毒物, 开展活性污泥呼吸速率的敏感性实验, 结果如图 1 所示。从图 1 看出, 参比毒物 3,5-DCP 对污泥呼吸速率的 3 h- EC_{50} 为 $18.12 \text{ mg}/\text{L}$, 该值在国标 GB/T 21796—2022 规定的 2~25 mg/L 质控范围内, 说明采用和处理的活性污泥可满足污泥敏感性要求。

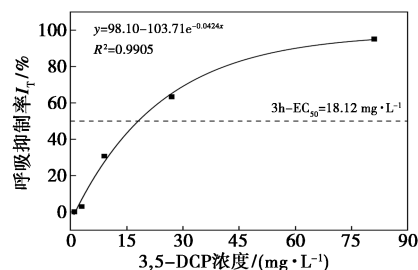


图 1 活性污泥呼吸抑制敏感性实验结果

2.2 污水活性污泥呼吸抑制实验结果

在预实验的基础上, 按污水体积分数为 10.0%、20.0%、40.0%、60.0% 和 80.0% 的梯度进行实验, 测试污水对活性污泥呼吸速率的抑制性。表 1 为加入不同浓度污水后测试得到的污泥总呼吸速率 R_T 、异养菌呼吸速率 R_H 、硝化细菌呼吸速率 R_N 。结果显示: ①加入废水后, 活性污泥的总呼吸速率 R_T 、异养菌呼吸速率 R_H 与硝化细菌呼吸速率 R_N 均明显低于空白对照组的总耗氧速率 R_{TB} 、异养菌呼吸速率 R_{TH} 与硝化细菌呼吸速率 R_{TN} , 说明污水对活性污泥中异养菌和硝化菌均有不同程度的抑制效应。②随着污水体积分数的提高, 活性污泥总呼吸抑制率 I_T 、异养菌呼吸速率抑制率 I_H 及硝化细菌呼吸速率抑制率 I_N 均逐渐增加, 10% 体积分数的污水对活性污泥总呼吸抑制率 I_T 、异养菌呼吸速率抑制率 I_H 及硝化细菌呼吸速率抑制率 I_N 分别为 14.88%、13.06% 和 21.53%, 而 80% 体积分数的污水对活性污泥呼吸抑制率分别增大到 52.69%、39.76% 和 99.88%。③丁苯橡胶污水对总的呼吸速

表 1 不同浓度污水对呼吸速率影响的实验结果

指标	丁苯橡胶污水体积分数					
	0%	10%	20%	40%	60%	80%
呼吸速率 R_T	25.06	21.33	19.36	18.18	14.90	10.60
异养菌呼吸速率 R_H	18.37	16.08	15.55	15.22	13.81	10.59
硝化菌呼吸速率 R_N	6.69	5.25	3.80	2.96	1.08	0.01

率的抑制率为 52.69%,对硝化作用抑制率为 99.88%,表明此污水对活性污泥中硝化菌的抑制效益更显著。

图 2 为活性污泥呼吸抑制率与污水浓度的回归结果。结合实验数据,将 3 h-EC₅₀ 结果取其倒数转换成毒性单位 TU,根据由 Persoone 等^[19]提出的毒性单位分级评价法对污水生物毒性等级进行划分,污水对活性污泥呼吸抑制实验的 3 h-EC₅₀ 值及生物毒性评价结果列于表 2。通过数据处理,得到污水对呼吸速率抑制率的回归方程为 $y = -8.88 + 22.52e^{0.0125x}$, 3 h-EC₅₀ 值为 76.89%, TU 为 1.30,生物毒性等级为中毒。

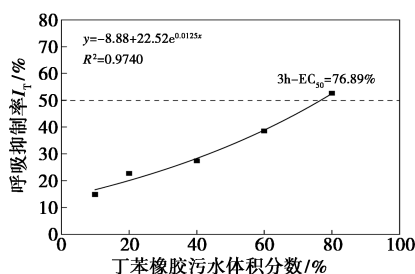


图 2 不同浓度污水对呼吸抑制率的影响及关联方程

表 2 生物毒性等级划分标准

TU	毒性等级	等级
TU < 0.4	无毒	I
0.4 ≤ TU < 1	微毒	II
1 ≤ TU < 10	中毒	III
10 ≤ TU < 100	高毒	IV
100 ≤ TU	剧毒	V

3 基于 GC/MS 的污水特征有机污染物定性检测

为了全面了解水质情况,首先对污水进行常规水质检测,包括 pH、电导率、COD、BOD、氨氮和 SS,结果列于表 3。由表 3 看出,污水 COD 值高,B/C 值为 0.19,废水可生化性较低。

表 3 丁苯橡胶污水部分水质指标检测结果

指标	pH	电导率/ ($\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$)	$\rho(\text{COD})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{BOD})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{氨氮})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	SS/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
数值	7.9	5.83×10^3	562	106	2.89	18

基于所建立的 GC/MS 检测方法,获得了丁苯橡胶污水的总离子流(TIC)谱图,见图 3。在此基础

上,结合水样的 NIST 谱库检索和人工解谱技术,对谱图中丰度较高的关键有机物进行定性分析。GC/MS 检测结果显示,检出的有机污染物主要源自其生产过程,主要包括橡胶生产原料(苯乙烯)、生产助剂(叔丁基苯酚、异丙基苯酚、抗氧化剂 264、邻苯二甲酸二异丁酯等)、中间产物或副产物(甲苯、苯、苯甲醛、苯乙酮、异丙基苯乙酮、三甲基苯乙酮、苯胺等)。但注意到,另有文献报道了丁苯橡胶中有机物的检测情况^[20-21],检测出的有机物类型与本研究成果大致相符,均以苯系物和苯酚类物质为主,但具体物质存在差异。这种差异归因于不同丁苯橡胶生产装置在工艺上的差异,进而影响了排放污水的具体水质成分。

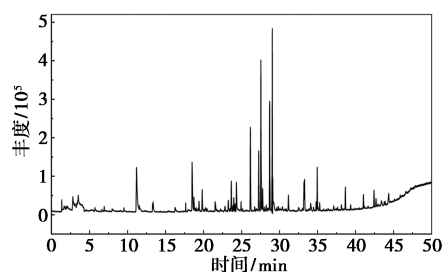


图 3 丁苯橡胶污水 GC/MS 检测总离子流(TIC)谱图

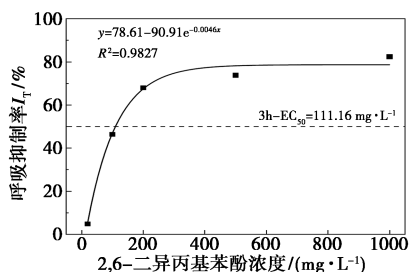
依据 GC/MS 定性检测结果,筛选出丰度较高且具有代表性的 10 种物质,将其作为引起污水毒性来源的考察物进行活性污泥呼吸抑制实验,分别为橡胶生产原料苯乙烯、生产助剂 2,4-二叔丁基苯酚(防老剂)、八甲基四硅氧烷(乳化剂)、2-乙基己醇(增塑剂)、棕榈酸(消泡剂)、邻苯二甲酸二异丁酯(增塑剂),以及副产物苯甲醛、苯乙酮、2,6-二异丙基苯酚、4-叔丁基苯磺酰胺。对筛选出的 10 种有机污染物开展活性污泥呼吸抑制实验,获得活性污泥毒性数据。

4 筛选的有机污染物对活性污泥的呼吸抑制结果

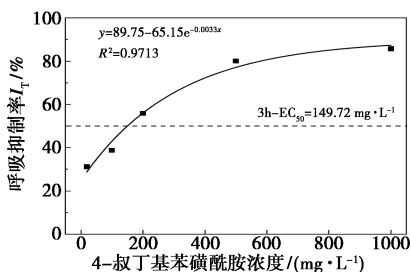
按照国标 GB/T 21796—2022 方法,对于能溶于水的有机物,均配制成 1 g/L 的受试物贮备液,再分别量取 1、10、100、200、400 mL 受试物贮备液加入到实验容器中;对于难溶于水、不溶于水的有机物,直接称量相应重量的受试物到实验容器中,得到浓度梯度为 20、100、200、500、1 000 mg/L 的实验混合液进行实验。

图 4 为活性污泥暴露于不同浓度的有机污染物

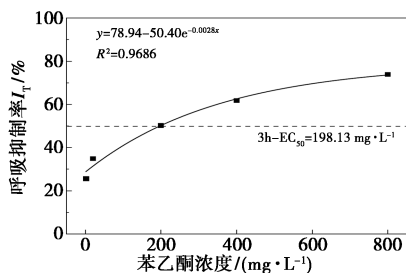
时活性污泥呼吸速率的抑制情况(仅列出 3 h-EC₅₀ < 1 000 mg/L 的有机物),表 4 为有机污染物对污泥呼吸抑制率 3 h-EC₅₀ 值。从实验结果看出:①在实验浓度范围内,2,4-二叔丁基苯酚、八甲基环四硅氧烷、苯乙烯和棕榈酸 4 种有机物的 3 h-EC₅₀ > 1 000 mg/L,即对活性污泥呼吸作用未产生明显抑制;②其余 6 种有机物加入使得活性污泥微生物的呼吸速率降低,且呼吸速率随着质量浓度的增加逐渐减弱,表明这 6 种物质对活性污泥具有不同程度的抑制性,其毒性大小依次为 2,6-二异丙基苯酚、4-叔丁基苯磺酰胺、苯乙酮、苯甲醛、2-乙基己醇、邻苯二甲酸二异丁酯,相应的 3 h-EC₅₀ 值分别为 111.16、149.72、198.13、323.61、365.60、393.24 mg/L。



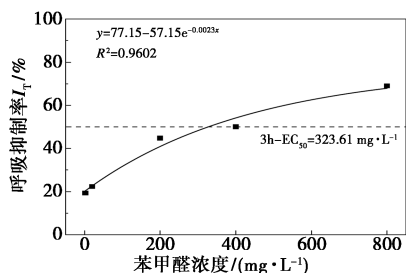
(a)



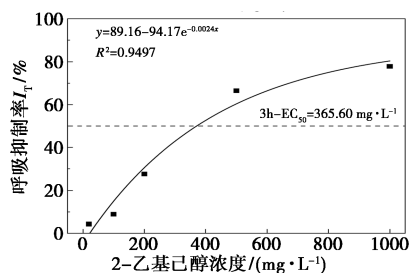
(b)



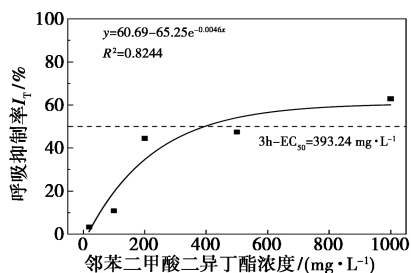
(c)



(d)



(e)



(f)

图 4 不同浓度有机污染物对活性污泥的呼吸抑制实验结果

表 4 有机污染物对污泥呼吸抑制率的拟合方程及 3 h-EC₅₀ 值

有机污染物	拟合方程	相关系数 R ²	3 h-EC ₅₀ / (mg·L ⁻¹)
2,6-二异丙基苯酚	$y = 78.61 - 90.91e^{-0.0104x}$	0.9827	111.16
4-叔丁基苯磺酰胺	$y = 89.75 - 65.15e^{-0.0033x}$	0.9713	149.72
苯乙酮	$y = 78.94 - 50.40e^{-0.0028x}$	0.9686	198.13
苯甲醛	$y = 77.15 - 57.15e^{-0.0023x}$	0.9602	323.61
2-乙基己醇	$y = 89.16 - 94.17e^{-0.0024x}$	0.9497	365.60
邻苯二甲酸二异丁酯	$y = 60.69 - 65.25e^{-0.0046x}$	0.8244	393.24
2,4-二叔丁基苯酚	$y = 42.96 - 41.11e^{-0.0035x}$	0.9813	>1000
八甲基环四硅氧烷	$y = 27.72 - 14.06e^{-0.0033x}$	0.9350	>1000
苯乙烯	$y = 25.24 - 24.75e^{-0.0045x}$	0.9917	>1000
棕榈酸	$y = 21.99 - 15.23e^{-0.0027x}$	0.9516	>1000

依据文献报道,当污染物浓度低于活性污泥呼吸抑制实验 3 h-EC₅₀ 值的 1/10 时,不会对微生物产生明显的抑制效应^[22]。基于此,污水在进入污水处理厂生化系统前,应将选定特征有机污染物浓度降低至 3 h-EC₅₀ 值的 1/10 以下,即微生物致毒性浓度阈值,以确保污水处理厂生化系统的正常运行。

5 结论

建立了基于活性污泥呼吸速率法测定和评估丁苯橡胶污水生物毒性的方法,结果表明,丁苯橡胶污水对活性污泥呼吸抑制率达到 52.69%,对硝化菌

呼吸抑制率达到 99.88%, 3 h-EC₅₀ 值为 76.89%, TU 为 1.30, 生物毒性等级为中毒。建立了基于 GC/MS 技术的污水中有机物检测方法, 筛选出丰度较高且具有代表性的 10 种物质为特征致毒性污染物。通过对筛选物质进行的污泥呼吸抑制性实验, 结果表明筛选物质中 2,6-二异丙基苯酚、4-叔丁基苯磺酰胺、苯乙酮、苯甲醛、2-乙基己醇和邻苯二甲酸二异丁酯对活性污泥活性具有明显抑制性, 而 2,4-二叔丁基苯酚、苯乙烯、棕榈酸和八甲基环四硅氧烷的抑制作用不明显。研究结果结论将为丁苯橡胶污水的综合治理提供基础数据和技术支持。

参考文献

- [1] 王雪, 王丽静, 郑方远, 等. 国产环保型填充油在溶聚丁苯橡胶中的应用研究[J]. 石油化工, 2024, 53(2): 204-208.
- [2] 张华, 刘光全, 张晓飞, 等. 石化废水溶解性有机物的组成特征及生物毒性[J]. 化工环保, 2023, 43(4): 534-540.
- [3] 张文静, 任晓兵, 王虎, 等. 乳聚丁苯橡胶污水的减排源头治理[J]. 当代化工, 2019, 48(6): 1258-1262.
- [4] 裘碧英, 韩勇涛, 谭溯睿. 水力循环澄清池+MBR 工艺处理橡胶废水的中试研究[J]. 工业水处理, 2010, 30(4): 52-55.
- [5] 邱强德, 张名. 市政污水处理厂重金属冲击后活性污泥的重建方法与调控策略[J]. 现代化工, 2024, 44(S2): 355-358, 365.
- [6] Papa M, Ceretti E, Viola G C V, et al. The assessment of WWTP performance: Towards a jigsaw puzzle evaluation? [J]. Chemosphere, 2016, 145: 291-300.
- [7] Yu X, Zuo J, Tang X, et al. Toxicity evaluation of pharmaceutical wastewaters using the alga *Scenedesmus obliquus* and the bacterium *Vibrio fischeri* [J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, 266: 68-74.
- [8] Plahuta M, Tišler T, Toman M J, et al. Toxic and endocrine disrupting effects of wastewater treatment plant influents and effluents on a freshwater isopod *Asellus aquaticus* (Isopoda, Crustacea) [J]. Chemosphere, 2017, 174: 342-353.
- [9] 赵建亮, 方怡向, 应光国. 工业废水毒性鉴定评价方法体系的建议及其应用示例[J]. 生态环境学报, 2011, 20(3): 549-559.
- [10] 胡洪营, 魏东斌, 董春宏. 污/废水的水质安全性评价与管理[J]. 环境保护, 2002, (11): 37-38, 41.
- [11] Kim C W, Kim B G, Lee T H, et al. Continuous and early detection of toxicity in industrial wastewater using an online respiration meter [J]. Water Science and Technology, 1994, 30(3): 11-19.
- [12] OECD. Test No. 209: Activated sludge, respiration inhibition test (carbon and ammonium oxidation) [S]. Paris: OECD Publishing, 2010.
- [13] 陈刚, 陈思远, 董姗姗, 等. 污水生物处理系统中呼吸测量技术的研究进展[J]. 现代化工, 2019, 39(4): 232-237.
- [14] 罗梦, 于茵, 周岳溪, 等. 石化废水处理过程中活性污泥毒性变化[J]. 中国环境科学, 2017, 37(3): 963-971.
- [15] Cristóvão R O, Pinto V M S, Martins R J E, et al. Assessing the influence of oil and grease and salt content on fish canning wastewater biodegradation through respirometric tests [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 127: 343-351.
- [16] 鞠晨曦, 李建军. 4 种重金属对活性污泥的呼吸抑制作用[J]. 工业水处理, 2018, 38(10): 17-20.
- [17] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 21796—2008. 化学品 活性污泥呼吸抑制试验[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- [18] 盖恒军, 庞欣然, 丰丙萧, 等. 煤热解废水成分分析及生物毒性评价[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(1): 103-109.
- [19] Persoone G, Marsalek B, Blinova I, et al. A practical and user-friendly toxicity classification system with microbioassays for natural waters and wastewaters [J]. Environmental Toxicology, 2003, 18(6): 395-402.
- [20] 尚海英, 席宏波, 周岳溪, 等. 丁苯橡胶生产废水的生物降解特性[J]. 环境科学研究, 2016, 29(6): 887-893.
- [21] 薛慧峰, 赵家林, 赵旭涛, 等. 丁苯橡胶废水中有机物的定性分析[J]. 分析化学, 2006, (S1): 141-144.
- [22] 古文, 周林军, 刘济宁, 等. 7 种酚类化学物质对活性污泥的呼吸抑制作用[J]. 生态毒理学报, 2015, 10(2): 276-282. ■

中化塑料连续四次通过海关高级信用资质认证

近日, 中化塑料收到北京海关认证通知书, 顺利通过《海关认证企业标准》全项审核, 成功蝉联“海关高级认证企业(AEO)”资质。

这是中化塑料自 2015 年首次获得该资质以来, 连续第四次通过认证, 充分彰显其在进出口合规管理与贸易安全体系建设方面持续稳居海关最高信用等级的综

合实力。

未来, 中化塑料将继续以高级认证标准为指引, 充分利用 AEO 企业享有的政策红利, 持续提升跨境贸易效率, 降低综合运营成本, 全力释放海外市场开拓能力与资源整合优势, 为国际业务供应链稳定畅通与高质量发展注入强劲动力。 (中化塑料)