

工业水处理

张敬敬, 安娜, 肖维贵, 等. 某水质净化厂工业废水预处理段工艺效能评估[J]. 净水技术, 2025, 44(8): 116–121, 153.

ZHANG J J, AN N, XIAO W G, et al. Efficiency evaluation of industrial wastewater pretreatment process for a WWTP[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(8): 116–121, 153.

某水质净化厂工业废水预处理段工艺效能评估

张敬敬^{1,2}, 安娜^{1,*}, 肖维贵¹, 张庆珮¹, 张金松¹

(1. 深圳环境水务集团, 广东深圳 518000; 2. 哈尔滨工业大学<深圳>土木与环境工程学院, 广东深圳 518000)

摘 要 【目的】随着工业化进程加速, 城镇污水处理厂接纳工业废水日益普遍。由于工业废水水量、水质波动大, 有毒、难降解污染物种类复杂, 有必要对纳入城镇污水处理厂的工业废水水质进行综合评估, 并采取针对性措施。文章以深圳市 G 水质净化厂工业废水预处理段“混凝沉淀+催化臭氧氧化”工艺为对象, 系统评估其对液晶面板企业尾水的处理效能, 重点关注毒性削减、有机物转化及对活性污泥功能的影响。【方法】文章利用常规指标检测、毒性评价、相对分子质量表征、光谱分析等多种检测手段对处理效能进行了评估分析。【结果】企业尾水平均 COD、BOD₅/COD 和发光细菌急性毒性分别为 35.3 mg/L、0.073 和 32.0%; 混凝和催化臭氧氧化出水 COD 平均去除率为 2.0% 和 5.8%, 可生化性没有显著变化, 发光细菌发光抑制率分别下降 7.3% 和 9.4%; 经预处理工艺后活性污泥反硝化性能无法完全恢复。尾水中相对分子质量为 1 000~3 000 Da 的有机物含量最高, 占比为 60.3%; 经催化臭氧工艺, 相对分子质量在 588~1 556 Da 的紫外吸收类物质增加 3.6%。三维荧光光谱分析表明, 催化臭氧氧化工艺能有效去除芳香蛋白类有机物。【结论】混凝+催化臭氧氧化预处理工艺能显著降低液晶面板企业尾水的生物毒性, 有效去除部分大分子有机物, 并减轻其对活性污泥硝化功能的抑制; 但对其可生化性提升及反硝化功能抑制的解除效果有限。建议 G 水质净化厂以毒性削减为导向, 优化该预处理工艺运行条件。

关键词 工业废水 城镇污水处理厂 混凝沉淀 催化臭氧氧化 效能评估

中图分类号: TU992 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)08-0116-07

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.08.015

Efficiency Evaluation of Industrial Wastewater Pretreatment Process for a WWTP

ZHANG Jingjing^{1,2}, AN Na^{1,*}, XIAO Weigui¹, ZHANG Qingpei¹, ZHANG Jinsong¹

(1. Shenzhen Water and Environment Group Co., Ltd., Shenzhen 518000, China;

2. School of Civil and Environmental Engineering, Harbin University of Technology, Shenzhen, Shenzhen 518000, China)

Abstract [Objective] With the accelerated advancement of industrialization, the acceptance of industrial wastewater by municipal wastewater treatment plants (WWTPs) has become increasingly prevalent. Considering large fluctuations in the quantity and quality of industrial wastewater and its complexity of toxic and refractory pollutants, it is necessary to conduct a comprehensive assessment of the quality of industrial wastewater entering municipal WWTPs and to implement targeted measures. This paper systematically evaluated the treatment efficiency of the 'coagulation-sedimentation + catalytic ozonation' process in the industrial wastewater pretreatment at Shenzhen G WWTP for liquid crystal panel manufacturing effluent, with a focused assessment on toxicity reduction, organic matter transformation, and impacts on activated sludge functionality. [Methods] Multiple analytical approaches were employed, including conventional parameter monitoring, toxicity evaluation, molecular weight characterization, and spectroscopic analysis. [Results] The result showed that the average COD, BOD₅/COD and luminous bacteria's acute toxicity of the influent were 35.3 mg/L, 0.073 and

[收稿日期] 2024-03-27

[基金项目] 国家重点研发计划(2021YFC3200605)

[作者简介] 张敬敬(1989—), 女, 博士研究生, 主要从事工业废水深度处理技术等工作, E-mail: zhangjingsz21@163.com。

[通信作者] 安娜(1979—), 女, 正高级工程师, 主要从事水务行业技术管理等工作, E-mail: anna_SZWG@hotmail.com。

32.0%, respectively. The average COD removal rates of coagulation and catalytic ozonation effluent were 2.0% and 5.8%, respectively. There was no significant change in biodegradability, and the luminous inhibition rates of luminescent bacteria were reduced by 7.3% and 9.4%, respectively. The denitrification performance of the activated sludge could not be completely restored after pretreatment. The content of organic matter with relative molecular mass from 1 000 Da to 3 000 Da was the highest in the influent, accounting for 60.3%; the relative molecular mass of UV-absorbing organic matter from 588 Da to 1 556 Da increased by 3.6% by catalytic ozone process. Three-dimensional fluorescence spectrum analysis showed that the catalytic ozonation process could effectively remove aromatic proteins. [**Conclusion**] The coagulation-coupled catalytic ozonation pretreatment process significantly reduced the bio-toxicity of industrial effluent from the liquid crystal display panel manufacturer, effectively removed certain macromolecular organic compounds, and alleviated its inhibition on nitrification functions in activated sludge systems. However, it demonstrated limited effectiveness in enhancing biochemical treatability and mitigating denitrification inhibition. It is recommended that G WWTP optimize the operational conditions of this pretreatment process by targeting the reduction of bio-toxicity.

Keywords industrial wastewater municipal WWTP coagulation and sedimentation catalytic ozonation efficiency evaluation

随着工业化生产的蓬勃发展,污水处理方式也逐渐多样化,城镇污水处理厂接纳工业废水的现象日益普遍^[1-3]。然而,工业废水若不经系统评价而纳入排水管网,可能会对污水处理设施运行的稳定性造成影响,进而引发区域水环境问题^[4-5]。液晶面板企业废水,由于含有大量有机氮、有机硫、光阻液等难生物降解的有机物,即使经过一级和二级处理,仍可能含有一定的有毒、有害物质^[6-7]。这种废水进入城市污水处理厂,可能会对生物处理过程造成冲击^[8-9],导致出水不达标。根据工业废水进水水质特点增加预处理单元、强化对企业尾水中难降解污染物的去除,对于污水处理厂来说,是实现其稳定运行和达标排放的重中之重^[10]。

深圳市某液晶面板企业尾水通过专管排入 G 水质净化厂与生活污水进行混合处理。鉴于企业废水可生化性较差,该水质净化厂为提高生化系统出水稳定性,降低运行风险,在生化段之前增加了“高效混凝沉淀+催化臭氧氧化”工艺对企业尾水进行预处理。混凝沉淀工艺操作简便、效率高,是工业废水处理的关键技术^[11-12]。催化臭氧氧化作为一种绿色清洁的高级氧化工艺,基本不产生化学污泥^[13-15],二者结合可有效实现工业废水的深度处理^[16]。

本文以 G 水质净化厂的工业废水预处理工艺段为研究对象,从常规指标检测、毒性评价、相对分子质量表征、光谱分析等多种手段评估了其对企业尾水的处理效能,可为该厂的运行管理优化和风险防范提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验水样

试验用水取自深圳市 G 水质净化厂二期工程工业废水预处理工艺段进出水。该厂二期工程市政污水平均进水量约为 10 万 m³/d,企业尾水平均进水量约为 1.8 万 m³/d;对企业尾水采用“高效沉淀池+催化臭氧氧化”进行预处理,经过预处理后的企业尾水和市政污水进行合并处理,处理工艺流程:强化脱氮改良厌氧-缺氧-好氧(AAO)生物反应池→矩形周进周出二沉池→磁混凝沉淀池→紫外消毒→加氯消毒。其中,工业废水预处理段工况条件:混凝沉淀段聚合氯化铝(PAC)及阴离子聚丙烯酰胺(PAM)投加量分别约为 15 mg/L 和 0.15 mg/L;催化臭氧氧化工艺选用铁基催化剂,臭氧投加量为 10 mg/L,停留时间为 36 min。企业尾水常规水质指标如下:COD 为 30~50 mg/L,UV₂₅₄ 为 0.149~0.120 cm⁻¹,pH 值为 6.8~7.1。

1.2 水质检测分析方法

COD 指标采用 HACH 预制试剂(超低量程:0.7~40.0 mg/L)快速消解法测定。BOD₅ 的测定方法为《水质 五日生化需氧量(BOD₅)的测定 稀释与接种法》(HJ 505—2009)。生物急性毒性通过《水质 急性毒性的测定 发光细菌法》(GB/T 15441—1995)测定。采用紫外可见分光光度计(铂金埃尔默 Lambda 365)测定水样的紫外可见吸收光谱。不同工艺段出水中溶解性有机物的表观分子量分布采用高效液相色谱仪(日本岛津 Shimazu LC20-AT),配备凝胶色谱柱(G3000SWXL 和 G2500PWXL)分离有机物,耦合总有机碳(TOC)及紫外检测器进行

测定。采用荧光分光光度计(日本日立 F-7000)测定三维荧光光谱。

1.3 活性污泥硝化反硝化毒性测试

活性污泥硝化反硝化毒性测试通过好氧和缺氧批次试验测定。市政污水与预处理工艺段进出水以体积比为 5 : 1 进行混合,取 G 水质净化厂二沉池回流污泥,平均分成 4 份,用蒸馏水洗涤 3 次,然后分别加入目标废水,随后加入 20 g/L 氯化铵溶液,使初始氨氮质量浓度为 30 mg N/L,控制溶解氧在 4~6 mg/L,持续时间为 300 min,每隔 30 min 取样。缺氧批次试验,先向体系中加入 100 g/L 乙酸钠溶液和 20 g N/L 硝酸钾溶液,使初始 COD 质量浓度为 200 mg/L,初始平均总无机氮(TIN)质量浓度为 30 mg N/L,然后进行缺氧搅拌,持续时长为 300 min,每隔 60 min 取样。氨氮采用《水质 氨氮的测定 纳

式试剂分光光度法》(HJ 535—2009)测定, NO_2^- -N 的测定采用《水质 亚硝酸盐氮的测定 分光光度法》(GB 7493—1987), NO_3^- -N 采用《水质 硝酸盐氮的测定 紫外分光光度法》(HJ/T 346—2007)测定。

2 结果与讨论

在一个月的时间内,对现场处理工艺段的企业尾水、混凝出水以及催化臭氧出水进行 3 次随机采样,并对其常规指标进行了检测分析。图 1 展示了 3 次水样 COD 和 BOD_5 测定结果。随机采样结果表明,虽然进水中污染物浓度不高,COD 平均质量浓度为 35.3 mg/L,但其可生化性较差, BOD_5/COD 均值为 0.073。混凝工艺段对有机物的去除效果有限,平均去除率为 2.0%;而催化臭氧工艺段对有机物的降解效果相对较好,平均去除率为 5.8%,2 种工艺对废水可生化性的提高作用有限。

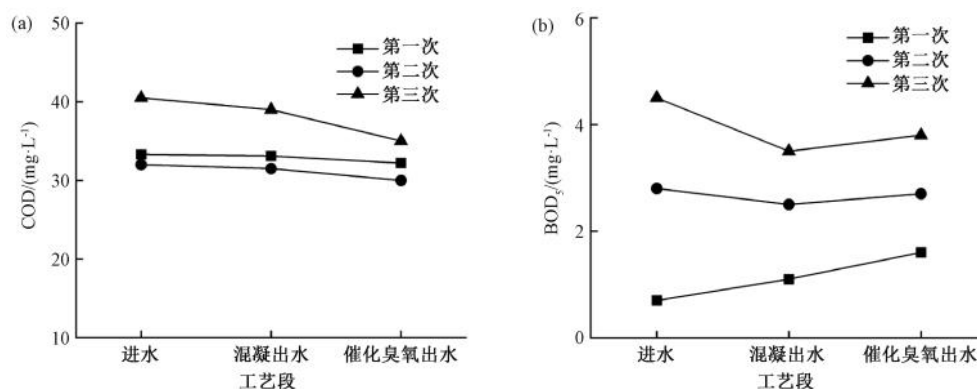


图 1 现场工业废水预处理工艺段进出水 COD 及 BOD_5 变化情况

Fig. 1 Variations of COD and BOD_5 of Influent and Effluent in On-Site Industrial Wastewater Pretreatment Process

发光细菌急性毒性测定广泛应用于环境毒理学和生态毒理学领域,可以快速高效地评价废水的急性毒性,该评价方法可以更好地了解水中毒性污染物对生化系统和环境可能造成的潜在危害^[17]。如图 2 所示,发光细菌急性毒性测定结果表明,3 次采样企业尾水的平均发光细菌抑制率为 32%,尽管混凝处理对 COD 的去除效果并不显著,但是生物毒性表现出了一定程度的降低,平均下降 7.3%。这一结果表明,部分毒性物质可能以悬浮固体的形态存在。此外,催化臭氧氧化处理对于废水中生物毒性的降低表现出更高的效率,平均下降 9.4%,可能与难降解有机物的断键分解有关。

为了进一步评估该液晶面板企业废水对 G 水质净化厂生化系统的毒性影响,将企业尾水与市政污水以 1 : 5 体积比混合后,通过批次试验,测定了

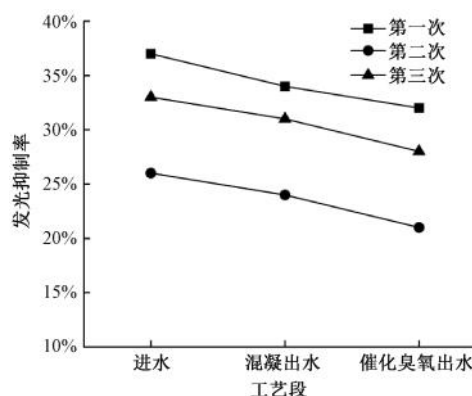


图 2 现场工业废水预处理工艺段进出水发光抑制率变化情况

Fig. 2 Variations of Luminescence Inhibition Ratio of Influent and Effluent in On-Site Industrial Wastewater Pretreatment Process

其对活性污泥的硝化与反硝化毒性。如图 3 所示,污泥比氨氮去除速率为 $0.58 \text{ mg}/(\text{L}\cdot\text{h}\cdot\text{g SS})$, 相比于市政污水组降低了 7.9%, 表明企业尾水对活性污泥的硝化速率有一定抑制作用。经混凝和催化臭氧处理后, 活性污泥的氨氧化速率分别提高至 $0.59 \text{ mg}/(\text{L}\cdot\text{h}\cdot\text{g SS})$ 和 $0.64 \text{ mg}/(\text{L}\cdot\text{h}\cdot\text{g SS})$, 最终可达到与市政污水组大致相等的水平; 表明 2 种工艺均可降低水中毒性物质对污泥硝化性能的抑制作用, 但混凝的提升作用相较于催化臭氧有限。进水对污泥反硝化性能的抑制相比于其对污泥硝化作用的抑

制更为显著, 平均 TIN 还原速率为 $0.568 \text{ mg N}/(\text{L}\cdot\text{h}\cdot\text{g SS})$, 相比市政污水对照组下降了 12.88%, 经混凝和催化臭氧后, 污泥反硝化速率分别提升了 6.86% 和 4.41%, 但依然无法完全恢复到与市政污水对照组相同的水平。

结合发光细菌生物急性毒性与企业尾水对污水厂活性污泥硝化反硝化毒性的测定结果可知, 企业尾水仍有一定的环境生物毒性, 但对 G 厂内的污泥硝化与反硝化作用的抑制相对较弱, 这是由于废水对活性污泥长期驯化作用。

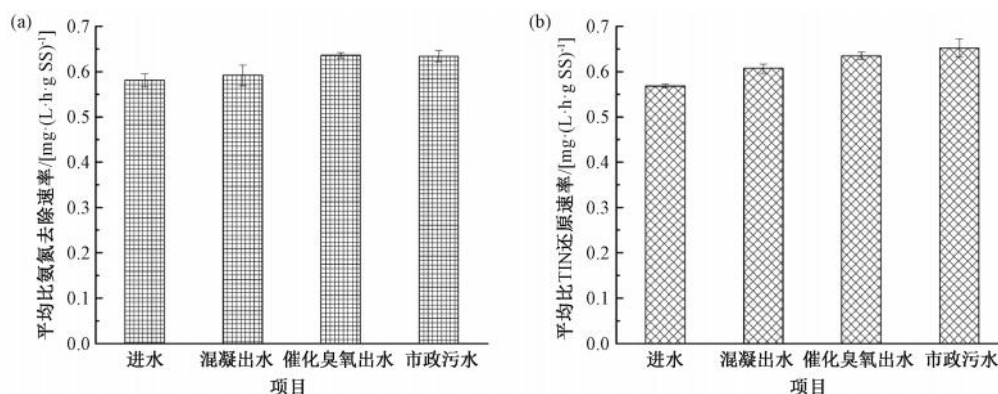


图 3 现场工业废水预处理工艺段进出水和市政污水对活性污泥(a)氨氮去除速率和(b)TIN 去除速率变化情况

Fig. 3 Variations of (a) Ammonia Nitrogen Removal Rate and (b) TIN Removal Rate in Activated Sludge for Influent and Effluent of On-Site Industrial Wastewater Pretreatment Process and Municipal Wastewater

不同工艺段进出水的连续紫外可见吸收光谱如图 4 所示。由图 4 可知, 进水中有机物在 $250 \sim 400 \text{ nm}$ 内有吸收, 该波长范围主要对应有机分子中的 $\pi \rightarrow \pi$ 和 $n \rightarrow \pi$ 跃迁^[18]。其中 UV_{254} 指标可以用来表征废水中的主要有机物如芳香族化合物, 含碳碳双键 ($\text{C}=\text{C}$)、碳碳三键 ($\text{C}\equiv\text{C}$) 以及羰基 ($\text{C}=\text{O}$) 等不饱和基团的有机物组分含量。以第 3 次水样为例, 混凝处理后废水中有机物的紫外吸收峰有轻微下降, 表明混凝处理对含不饱和键的有机物有一定去除。催化臭氧出水 UV_{254} 值 (0.187 cm^{-1}) 均比进水 (0.167 cm^{-1}) 及混凝出水 (0.160 cm^{-1}) 高, 可能是由于经催化臭氧氧化后, 大分子难降解物质断键生成了新的醛或酮等小分子物质。

体积排阻色谱法 (SEC) 可以与不同的检测器, 如 TOC 检测器、紫外检测器、荧光检测等联合使用, 用于表征有机物相对分子质量与对应的检测指标之间的关系, 该分析手段可以帮助我们深入了解水处理过程中有机物的降解转化情况^[19-20]。利用 SEC-TOC 系统分别对进水、混凝出水、催化臭

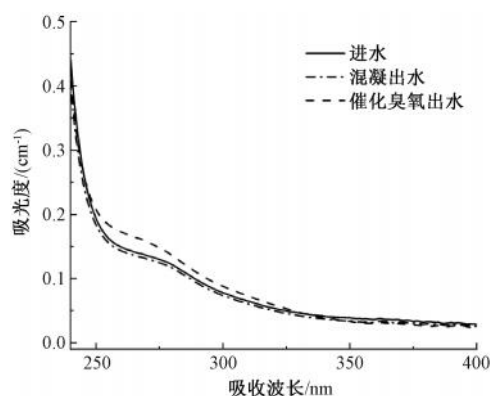


图 4 现场工业废水预处理工艺段进出水紫外可见光谱变化情况

Fig. 4 Variations of UV-Vis Absorption Spectra of Influent and Effluent in On-Site Industrial Wastewater Pretreatment Process

氧出水进行分析检测。如图 5(a) 所示, 2 个工艺段出水的 TOC 信号强度均有一定程度减弱, 通过区域面积积分计算可知, 混凝出水和催化臭氧出水相比进水分别降低了 5.6% 和 11.2%, 进一步说

明现场工艺对企业尾水有机物的去除有一定的效果;SEC-紫外系统检测结果如图 5(b) 所示,进水中对紫外有吸收的大相对分子质量物质(1 556~2 843 Da)占比为 6.5%,混凝仅去除 0.7%,催化臭氧去除了 1.2%。然而经催化臭氧工段后相对分子质量在 588~1 556 Da 的有机物占比达 27.6%,相比进水升高了 3.6%,混凝工艺段对该

范围内的有机物几乎没有去除作用,说明经高级氧化降解后,一部分难降解物质转化为相对分子质量较小的物质,这也与紫外可见光谱的结果一致;另外对紫外有吸收的有机物相对分子质量主要集中在 210~588 Da,进水中占比为 69.6%;经混凝和催化臭氧后该相对分子质量范围内的有机物分别下降 5.5%和 1.9%。

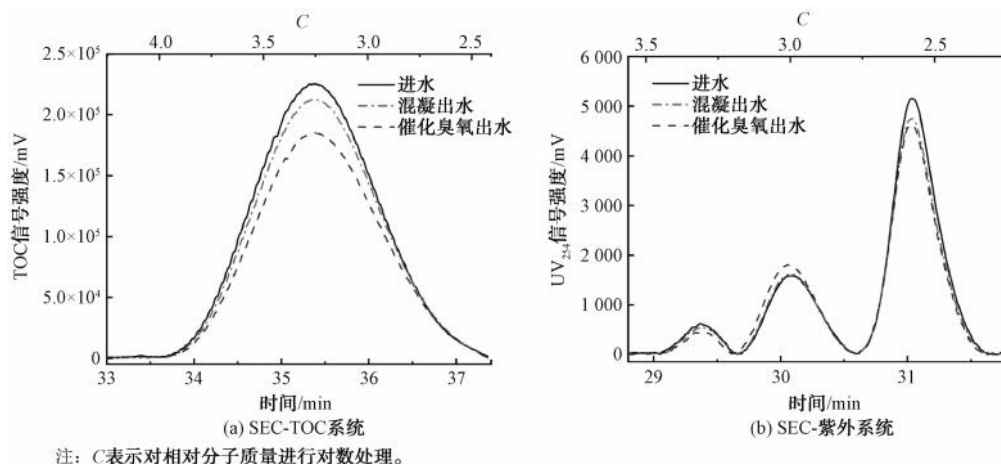


图 5 现场工业废水预处理工艺段进出水表观相对分子质量分布变化

Fig. 5 Variations of Relative Molecular Mass Distribution of Influent and Effluent in On-Site Industrial Wastewater Pretreatment Process

三维荧光光谱结果分析如图 6 所示,结果表明,企业尾水中主要含有芳香蛋白类、腐植酸类、微生物活动相关的代谢产物等;混凝出水中芳香蛋白类物质略有增多,可能原因为采样时间处于夏初,其混凝工艺段有一定的藻类滋生,藻类分泌物含有一定的

荧光类物质;催化臭氧出水中荧光类物质均略有减少,其中区域 I 中的有机物质荧光强度下降最明显,说明催化臭氧氧化段对芳香蛋白类物质具有较好的去除效果。

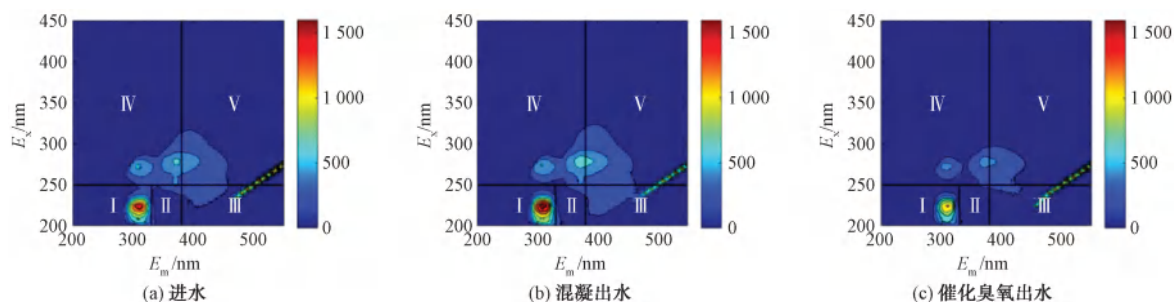


图 6 现场工业废水预处理工艺段进出水荧光光谱

Fig. 6 Fluorescence Spectra of Influent and Effluent in On-Site Industrial Wastewater Pretreatment Process

3 结论

(1) 纳入 G 水质净化厂的液晶面板企业废水虽污染物浓度不高但为难降解有机物,可生化性较差, $BOD_5/COD < 0.1$ 且具有一定生物毒性;有机污染物相对分子质量以 1 000~3 000 Da 为主,占比为 60.3%。

(2) 企业废水经“混凝+催化臭氧氧化”工艺段后,其对发光细菌发光抑制率分别下降 7.3% 和 9.4%,对活性污泥的硝化抑制作用解除,反硝化抑制程度下降 87.5%,但可生化性没有明显改善;催化臭氧氧化工艺可使废水中部分大分子有机物发生断键转化,对荧光蛋白类物质去除效果显著。

(3)建议在水质变化不大的情况下,G 水质净化厂以降低该液晶面板企业废水的毒性影响作为主要考量指标来进行工业废水预处理段工况的调整优化。

参考文献

- [1] OLAJIRE A A. The brewing industry and environmental challenges[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 256: 102817. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.102817.
- [2] 郝吉明, 田金平, 卢琬莹, 等. 长江经济带工业园区绿色发展策略研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(1): 155-165.
HAO J M, TIAN J P, LU W Y, et al. Green development of industrial parks in the Yangtze River Economic Belt [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(1): 155-165.
- [3] 潘名宾, 潘维龙, 陈燕波, 等. 某大型综合化工园区污水处理厂分质提标工程设计[J]. 中国给水排水, 2021, 37(18): 70-75.
PAN M B, PAN W L, CHEN Y B, et al. Design of separate upgrading project of a wastewater treatment plant in a large comprehensive chemical park [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(18): 70-75.
- [4] 尹真真, 赵丽, 范围, 等. 城市生活污水厂处理工业废水的运营管理对策[J]. 中国给水排水, 2020, 36(24): 54-59.
YIN Z Z, ZHAO L, FAN W, et al. Suggestions on operation and management of urban domestic sewage treatment plant handled industrial wastewater [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(24): 54-59.
- [5] 王剑秋, 丁强, 宋新新, 等. 城镇污水处理厂接收外部污水的管控建议[J]. 给水排水, 2023, 49(10): 28-32, 37.
WANG J Q, DING Q, SONG X X, et al. Suggestions on operation and management of urban domestic sewage treatment plant handled industrial wastewater [J]. China Water & Wastewater, 2023, 49(10): 28-32, 37.
- [6] 曹依晴, 吕娟, 董佳奇, 等. 液晶面板显影液废水中常见物质对 TMAH 厌氧降解的影响[J]. 净水技术, 2023, 42(4): 111-120.
CAO Y Q, LÜ J, DONG J Q, et al. Influence of common substances in wastewater of LCD panel developer on anaerobic degradation of TMAH [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(4): 111-120.
- [7] 张红, 黄建, 鞠兴华, 等. 工业废水对不同污水处理厂生化工艺段的影响[J]. 工业水处理, 2019, 39(12): 29-32.
ZHANG H, HUANG J, JU X H, et al. Effects of industrial wastewater on biological processes in different municipal wastewater treatment plants [J]. Industrial Water Treatment, 2019, 39(12): 29-32.
- [8] 胡洪营, 吴乾元, 吴光学, 等. 污水特质(水征)评价及其在污水再生处理工艺研究中的应用[J]. 环境科学研究, 2019, 32(5): 725-733.
- HU H Y, WU Q Y, WU G X, et al. Evaluation of water feature and its application in the wastewater reclamation [J]. Research of Environmental Sciences, 2019, 32(5): 725-733.
- [9] 王文龙, 吴乾元, 杜焯, 等. 城市污水再生处理中微量有机污染物控制的关键难题与解决思路[J]. 环境科学, 2021, 42(6): 2573-2582.
WANG W L, WU Q Y, DU Y, et al. Key problems and novel strategy of controlling emerging trace organic contaminants during municipal wastewater reclamation [J]. Environmental Science, 2021, 42(6): 2573-2582.
- [10] CHEN K H, WANG H C, HAN J L, et al. The application of footprints for assessing the sustainability of wastewater treatment plants: A review [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 277: 124053. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124053.
- [11] 关永年. 高排放标准下某高新园区污水处理厂工程实例 [J]. 给水排水, 2022, 48(12): 89-94, 111.
GUAN Y N. Example of wastewater treatment plant project in a high-tech park under high discharge standard [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(12): 89-94, 111.
- [12] 罗华瑞, 卫少华, 钱东, 等. 精细化工废水混凝深度净化效果及水征分析[J]. 净水技术, 2023, 42(11): 127-135.
LUO H R, WEI S H, QIAN D, et al. Effect and water feature analysis on fine chemical wastewater by coagulation and advanced purification [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(11): 127-135.
- [13] 杨志林, 程传, 程志刚, 等. 臭氧催化氧化深度处理石油化工废水存在问题研究[J]. 工业用水与废水, 2020, 51(4): 38-40.
YANG Z L, CHENG C, CHENG Z G, et al. Research on problems of advanced treatment of petrochemical wastewater by catalytic ozonation [J]. Industrial Water & Wastewater, 2020, 51(4): 38-40.
- [14] 余波, 李箫宁, 张名, 等. 臭氧催化氧化技术用于工业园区综合废水处理研究[J]. 给水排水, 2023, 49(11): 74-79.
YU B, LI X N, ZHANG M, et al. Study on comprehensive wastewater treatment in an industrial park by catalytic ozone oxidation technology [J]. Water & Wastewater Engineering, 2023, 49(11): 74-79.
- [15] 黄南, 李阳, 吴乾元, 等. 臭氧高效催化氧化处理城市污水反渗透浓水[J]. 工业水处理, 2021, 41(12): 56-59.
HUANG N, LI Y, WU Q Y. Effective treatment of municipal wastewater reverse osmosis concentrate by catalytic ozonation technology [J]. Industrial Water Treatment, 2021, 41(12): 56-59.
- [16] 仇欢. 催化臭氧/混凝深度去除化工园区生化尾水中典型有机物研究[D]. 南京: 南京大学, 2022.

(下转第 153 页)

- 化处理效果的影响及最佳浓度分析[J]. 净水技术, 2022, 41(7): 131-137.
- HUANG J, CAI S W, WANG F S. Effect of CaCl_2 and NaHCO_3 on mineralization treatment of desalinated seawater and analysis of optimum concentration [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(7): 131-137.
- [6] 葛云红, 李炎, 安子韩, 等. 海水淡化水可饮用性分析[J]. 盐科学与化工, 2021, 50(2): 49-52.
- GE Y H, LI Y, AN Z R, et al. Analysis on the drinkability of seawater desalination water [J]. Journal of Salt Science and Chemical Industry, 2021, 50(2): 49-52.
- [7] 高文海, 张彦菊, 程欣欣, 等. 饮用水硬度详述及其对口感健康影响分析[J]. 食品工业, 2023, 44(6): 148-152.
- GAO W H, ZHANG Y J, CHENG X X, et al. Cognitive understanding of drinking water hardness and analysis of its health effects[J]. Food Industry, 2023, 44(6): 148-152.
- [8] Martin Fox. 健康的水[M]. 罗敏, 周蓉, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- FOX M. Healthy water [M]. LUO M, ZHOU R, translated. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011.
- [9] 世界卫生组织. 饮用水水质准则[M]. 4 版. 上海供水调度监测中心, 上海交通大学, 译. 上海: 上海交通大学出版社, 2021.
- World Health Organization. Guidelines for drinking-water quality [R]. 4th ed. Shanghai Water Supply Dispatching and Monitoring Center, Shanghai Jiao Tong University, translated. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2021.
- [10] 舒为群. 反渗透技术冲击下军队给水卫生工作的思考[J]. 第三军医大学学报, 2019, 41(19): 1840-1845.
- SHU W Q. Thinking on military water sanitation under the impact of reverse osmosis technology [J]. Acta Academiae Medicinae Militaris Tertiae, 2019, 41(19): 1840-1845.
- [11] 赵同国. 渐进冷冻-融化法除硼及海水淡化的研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2022.
- ZHAO T G. Progressive freezing-thawing method for boron removal and seawater desalination [D]. Yantai: Yantai University, 2022.

(上接第 121 页)

- QIU H. Study on advanced removal of typical organics in secondary effluent from the chemical industry park by catalytic ozonation coagulation process [D]. Nanjing: Nanjing University, 2022.
- [17] 周彦宏, 王丹, 李珊珊, 等. 应用明亮发光杆菌检测联合毒性的研究进展[J]. 环境科学与技术, 2022, 45(8): 117-131.
- ZHOU Y H, WANG D, LI S S, et al. Advances in the application of Photobacterium phosphoreum on joint toxicity detection[J]. Environmental Science & Technology, 2022, 45(8): 117-131.
- [18] 杨臣强, 杨瑞, 于玉洁, 等. 基于三维荧光光谱-平行因子分析及紫外-可见吸收光谱对制药污水不同处理工艺单元溶解性有机物特征分析[J]. 环境工程学报, 2023, 17(10): 3444-3453.
- YANG C Q, YANG R, YU Y J, et al. Characterization of dissolved organic matter in pharmaceutical wastewater treatment process units based on three-dimensional fluorescence spectroscopy-parallel factor analysis and ultraviolet-visible absorption spectroscopy [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(10): 3444-3453.
- [19] HANSON B, WÜNSCH U, BUCKLEY S, et al. DOM molecular weight fractionation and fluorescence quantum yield assessment using a coupled in-line sec optical property system [J]. ACS ES&T Water, 2022, 2(12): 2491-2501.
- [20] 周合喜, 罗华瑞, 李华伟, 等. 化工园区废水处理过程中溶解性有机物变化特征[J]. 中国给水排水, 2022, 38(23): 80-87.
- ZHOU H X, LUO H R, LI H W, et al. Variation characteristics of dissolved organic matter in wastewater treatment process of chemical industrial park [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(23): 80-87.