

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.23.010

# 三氯卡班对污水生物脱氮及 $N_2O$ 释放特征的影响

孙书荃<sup>1,2</sup>, 高川<sup>1,2</sup>, 张帆<sup>1</sup>, 陈星<sup>1,2</sup>, 刘金蕾<sup>3</sup>

(1. 黄河水利职业技术学院 环境工程学院, 河南 开封 475004; 2. 开封市水环境污染监测工程技术研究中心, 河南 开封 475004; 3. 河南工程学院 环境与生物工程学院, 河南 郑州 450000)

**摘要:** 在中温条件下构建序批式反应器,探究三氯卡班(TCC)浓度对废水生物脱氮及温室气体 $N_2O$ 释放特征的影响,并通过分析TCC对反硝化污泥特征、微生物代谢活性的影响来揭示相关机制。结果表明,当TCC浓度达到5 mg/L以上时会抑制反硝化系统对COD和TN的去除,而当TCC浓度达到10 mg/L时才抑制 $NH_4^+-N$ 的去除。 $N_2O$ 释放速率随着TCC浓度的增加而升高,高浓度TCC组别 $N_2O$ 的释放速率可提高至8.9~10.2  $\mu\text{g}/\text{min}$ 。高浓度TCC降低了污泥浓度及有机质占比,提高了污泥体积指数,并延长了毛细吸水时间。此外,高浓度TCC刺激了胞外聚合物(EPS)分泌,但降低了EPS内蛋白质/多糖(PN/PS)值。TCC改变了反硝化脱氮系统内微生物的代谢活性,高浓度TCC导致活性氧和乳酸脱氢酶的释放。

**关键词:** 三氯卡班; 生物脱氮;  $N_2O$ 释放; 活性氧

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)23-0070-07

## Impact of Trichlorocarbon on Biological Nitrogen Removal and $N_2O$ Emission from Wastewater

SUN Shu-quan<sup>1,2</sup>, GAO Chuan<sup>1,2</sup>, ZHANG Fan<sup>1</sup>, CHEN Xing<sup>1,2</sup>, LIU Jin-lei<sup>3</sup>

(1. School of Environmental Engineering, Yellow River Conservancy Technical Institute, Kaifeng 475004, China; 2. Kaifeng Municipal Water Environmental Pollution Monitoring Engineering Technology Research Center, Kaifeng 475004, China; 3. School of Environment and Bioengineering, Henan University of Engineering, Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** A sequencing batch reactor was established under mesophilic conditions, the influence of trichlorocarbon (TCC) concentration on biological nitrogen removal and greenhouse gas  $N_2O$  emission characteristics was examined, and the underlying mechanism was elucidated through analyzing the effects of TCC on denitrifying sludge properties and microbial metabolic activity. When the concentration of TCC exceeded 5 mg/L, the removal efficiencies of COD and TN in the denitrification system were adversely affected. Furthermore, at the TCC concentration reaching 10 mg/L, the removal of  $NH_4^+-N$  was also inhibited. The rate of  $N_2O$  release was positively correlated with the concentration of TCC exposure, with the high-concentration TCC group exhibiting an increase in  $N_2O$  release rate to 8.9–10.2  $\mu\text{g}/\text{min}$ . The elevated concentration of TCC led to a reduction in sludge concentration and organic matter proportion, an increase in the sludge volume index, and an extension of capillary suction time. Furthermore, elevated

基金项目: 河南省科技发展计划项目(222102320424); 河南省教育厅重点项目(22B610005)

concentrations of TCC induced the secretion of extracellular polymeric substances (EPS), while concurrently reducing the protein/polysaccharide (PN/PS) ratio within EPS. TCC altered the metabolic activity of microorganisms within the denitrification system, and elevated concentrations of TCC resulted in the release of reactive oxygen species and lactate dehydrogenase.

**Key words:** trichlorocarbon; biological nitrogen removal;  $N_2O$  emission; reactive oxygen species

三氯卡班(TCC)是一种光谱类抗菌剂,其已成为环境中检出频率较高的一类污染物<sup>[1]</sup>。TCC在水中难降解,且其具有生态毒性,因此对生态环境构成潜在威胁。TCC具有中度疏水性和亲脂特性,其在污水生物处理过程中会吸附在污泥等悬浮固体上进而影响污泥内微生物的活性行为及功能基因表达<sup>[2]</sup>。TCC能抑制人类和动物的生长发育,Kajita等<sup>[3]</sup>将神经元细胞暴露于TCC 24 h后,ESR1和GPER1的mRNA及蛋白质表达受到不同程度的抑制。近年来,关于TCC在污水处理中的影响行为及效应得到了广泛关注<sup>[4]</sup>。

污水处理厂是污水进入自然环境的最后一道屏障。Wang等<sup>[5]</sup>报道了以长沙为代表的中国中部地区的5座污水处理厂内TCC浓度高达0.06~0.76 mg/L。Wang等<sup>[6]</sup>调查活性污泥法去除TCC时发现,TCC的去除主要依赖活性污泥的吸附行为,且TCC降低了活性污泥对营养盐的去除效果。此外,经过活性污泥处理后,TCC的生态毒性降低,IC<sub>50</sub>降低至0.54 mg/L,TCC还会影响活性污泥群落中硝化细菌和反硝化细菌的丰度<sup>[7]</sup>。进一步研究发现,反硝化细菌主要通过非均相多层吸附去除TCC,且活性污泥内羟基、酰胺和多糖是吸附位点<sup>[5]</sup>。在酶活性抑制方面,TCC能抑制生物脱氮(BNR)过程中氨单加氧酶(AMO)、硝酸还原酶(NAR)和亚硝酸盐还原酶(NIR)的活性<sup>[8]</sup>。 $N_2O$ 是活性污泥反硝化脱氮过程释放的温室气体,而TCC的暴露对生物反硝化脱氮的影响行为及 $N_2O$ 释放特征的研究仍较匮乏。因此,有必要考察TCC暴露对活性污泥反硝化脱氮及 $N_2O$ 释放的影响,并阐释其中的机制。

笔者考察了TCC对生物反硝化脱氮系统运行效能及 $N_2O$ 释放特征的影响。首先,研究TCC浓度对反硝化系统运行效能及 $N_2O$ 释放特征的影响;随后,分析了TCC对反硝化脱氮系统中污泥特征的影响;最后,探讨了TCC暴露对反硝化系统中微生物

代谢活性的影响。旨在为反硝化脱氮系统处理含TCC废水提供一定的数据支撑,并为温室气体的减排提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

接种污泥来源于城镇污水处理厂二沉池,该污水厂主要采用好氧/厌氧工艺处理城镇低C/N污水。取回后的接种污泥采用2.0 mm筛网过滤后备用。接种污泥的主要特征如下:pH为7.1,总悬浮固体(TSS)为4.2 g/L,挥发性悬浮固体(VSS)为3.8 g/L,胞外聚合物(EPS)为79.5 mg/g。

实验用水为不含TCC的人工合成污水,合成污水中碳源和氮源分别由丙酸钠和氯化铵提供,且COD浓度为500 mg/L、 $NH_4^+-N$ 浓度为200 mg/L。进水 $NO_2^--N$ 和 $NO_3^--N$ 浓度可以忽略。此外,向人工合成污水中添加2.0 mL/L的微量元素储备液,微量元素储备液的主要构成如下:1.50 g/L的 $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ 、0.15 g/L的 $CoCl_2 \cdot 6H_2O$ 、0.15 g/L的 $H_3BO_3$ 、0.12 g/L的 $MnCl_2 \cdot 4H_2O$ 、0.12 g/L的 $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 、0.06 g/L的 $Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$ 、0.03 g/L的KI和0.03 g/L的 $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ 。

TCC购买于上海某生物医药有限公司,购买后的TCC存贮于恒温冰箱内,并将0.5 g的TCC置于1.0 L的纯净水中,配制成浓度为500 mg/L的TCC母液。TCC的纯度超过98%,相对密度为1.534,熔点为254~256 °C。

### 1.2 实验方法

实验设置4组相同的序批式反应器(SBR),有效工作容积为5.0 L,反应器底部设有机机械搅拌装置,工作时控制转速为200~1 500 r/min。SBR侧面设有进、排水口,直径为2.0 cm。每组反应器内引入2 L接种污泥和3 L合成污水。鉴于TCC在实际污水中的背景浓度和文献推荐值<sup>[5]</sup>,以及未来TCC生产与消耗量的不断增加,TCC在水环境尤其是污

水中的背景浓度将持续增加,因此实验中选取的TCC浓度分别为1、5和10 mg/L。其中一组反应器不注入TCC母液,将其作为对照组。SBR每日运行3个周期,每个周期的具体运行模式如下:快速进水2 min、缺氧118 min、好氧曝气150 min、沉淀出水30 min和闲置180 min。在好氧末期排泥64 mL以保证污泥停留时间为18 d。各组SBR在室温为31~35℃的恒温空调房内运行,每个周期的体积交换率为66%。

### 1.3 分析项目与方法

按标准方法测定COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TN浓度。采用 $\text{N}_2\text{O-NP}^\circ$ 微传感器测定 $\text{N}_2\text{O}$ 浓度,并根据上述方法计算 $\text{N}_2\text{O}$ 总排放量,进而计算 $\text{N}_2\text{O}$ 的释放速率。采用ROS试剂盒检测活性氧(ROS)和乳酸脱氢酶(LDH)释放量。毛细吸水时间(CST)通过CST测定仪测定。污泥的TSS、VSS、SVI等指标参考文献[9]测定。EPS采用热提取法检测,具体流程如下:将50 mL污泥样品离心(550 r/min)15 min,然后将0.01 mol/L的NaCl加入样品中洗涤1~2次,去除上清液后,添加0.01 mol/L的NaCl使污泥悬浮至50 mL,蛋白质(PN)采用改良的劳利法测定,多糖(PS)采用苯酚硫酸法测定。

## 2 结果与讨论

### 2.1 TCC对反应器性能的影响

图1为TCC对BNR系统中COD和含氮物质去除效果的影响。可以看出,低浓度TCC(1 mg/L)未对COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TN的去除效果产生显著影响,稳定运行时期,对照组和1 mg/L TCC组别中COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TN的去除率均维持在86.6%~89.9%、95.2%~96.8%和74.2%~76.8%。当TCC浓度达到5 mg/L以上时,COD和TN去除率明显下降。而当TCC浓度达到10 mg/L时,对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果才受到抑制。当TCC浓度为10 mg/L时,对COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TN的去除率分别降至80.6%~82.3%、90.8%~92.5%和64.4%~65.2%。上述结果表明,TCC对污染物和营养盐的去除与其剂量相关,高浓度TCC抑制了反硝化系统对COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TN的去除。在污染物去除方面,TCC抑制活性污泥去除污染物的机制包括直接抑制微生物活性、影响微生物群落结构以及通过耦合反应降低污泥中TCC的富集等。

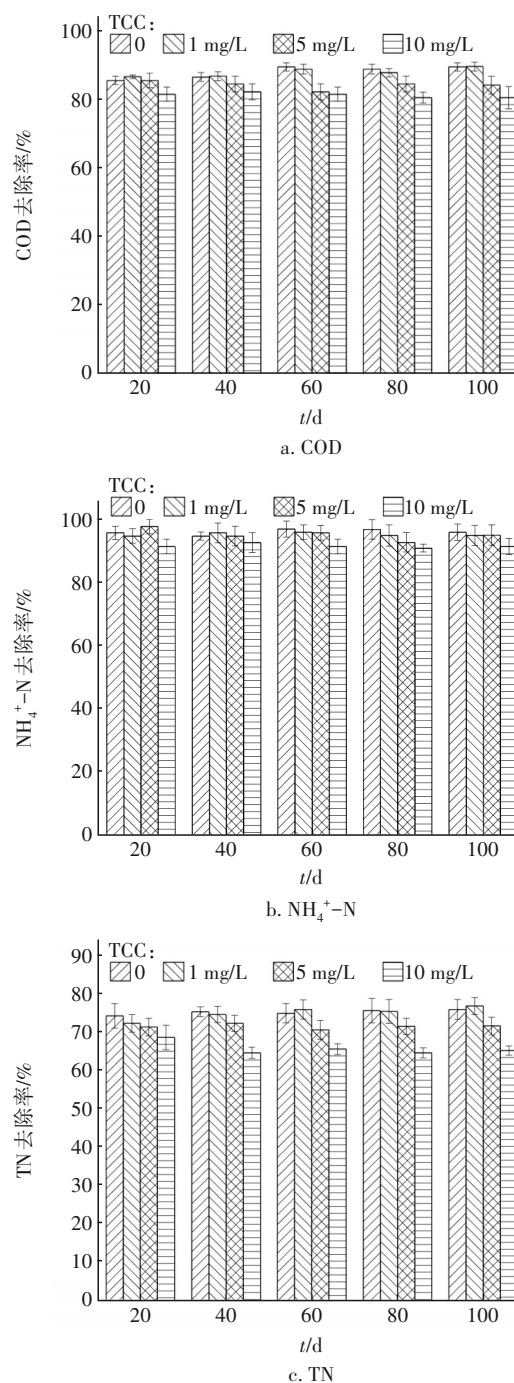


图1 TCC对BNR系统中COD和含氮物质去除效果的影响

Fig.1 Effect of TCC concentration on COD and nitrogenous substances removal in BNR system

在生物脱氮方面,Zhang等<sup>[10]</sup>证实TCC会对脱氮微生物产生负面影响,当TCC浓度达到25  $\mu\text{g/L}$ 时会阻碍反硝化作用,并且在浓度达到50  $\mu\text{g/L}$ 时可完全抑制该过程。本实验中,当TCC浓度达到1 mg/L时仍未对生物脱氮产生抑制作用的原因在于选用的接种污泥富含混合菌,而Zhang等<sup>[10]</sup>所采用的为



纯菌 *Paracoccus denitrificans* PD1222。因此,在传统反硝化活性污泥中,接种物为混合菌群时,低于1 mg/L的TCC未能影响COD和生物脱氮过程,而当超过5 mg/L时则降低了COD和生物脱氮效率。

## 2.2 TCC对 $N_2O$ 释放特征的影响

在生物反硝化过程中也会产生 $N_2O$ ,其是一种比 $CO_2$ 具有更强温室效应的气体。 $N_2O$ 的排放不仅对气候变化有显著影响,还参与臭氧层的破坏,会对环境和人类健康构成威胁。图2为TCC对反硝化脱氮过程中 $N_2O$ 释放速率的影响。可以看出,TCC提高了 $N_2O$ 的释放速率。当TCC浓度达到5 mg/L以上时, $N_2O$ 释放速率显著提高,尤其是10 mg/L的TCC组别,其 $N_2O$ 释放速率提高至8.9~10.2  $\mu\text{g}/\text{min}$ ,显著高于对照组在稳定时期的6.1~6.8  $\mu\text{g}/\text{min}$ 。TCC可能抑制反硝化过程中的关键酶,如亚硝酸盐还原酶(NIR)和一氧化氮还原酶(NOR),导致 $N_2O$ 不能被有效还原为氮气,从而增加 $N_2O$ 的释放<sup>[11]</sup>。此外,还发现TCC的存在可能会改变反硝化系统中微生物的群落结构,选择性地促进或抑制某些微生物的生长,进而影响 $N_2O$ 的产生和释放<sup>[12]</sup>。

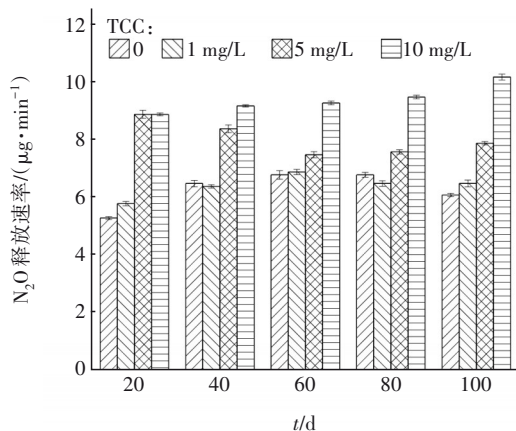


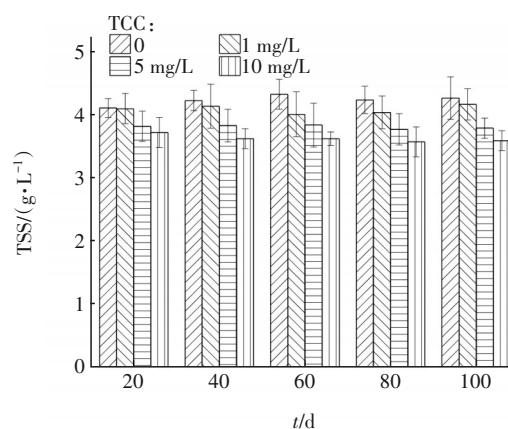
图2 TCC对反硝化脱氮过程中 $N_2O$ 释放速率的影响

Fig.2 Effect of TCC concentration on  $N_2O$  release rate during denitrification process

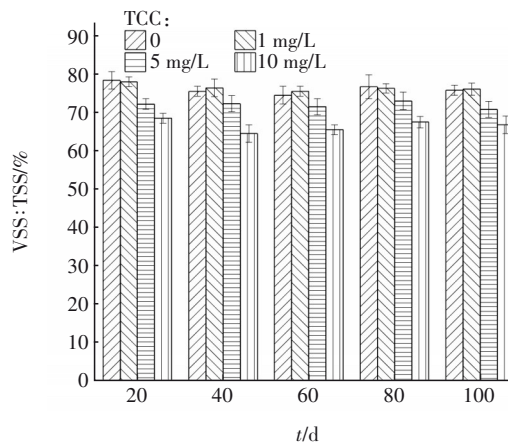
## 2.3 TCC对反硝化污泥特征的影响

TCC对反硝化污泥浓度及有机质占比的影响如图3所示。可以看出,低浓度TCC未对反硝化污泥浓度及有机质占比产生显著影响。稳定时期,对照组和低浓度TCC组别的TSS浓度和有机质占比分别为4.15~4.32 g/L和75.4%~78.5%。当TCC浓度超过5 mg/L时则降低了反硝化污泥浓度及有机质占比,且存在TCC浓度越高,污泥浓度和有机质占比

下降越显著的特点。当TCC浓度为10 mg/L时,稳定时期TSS浓度下降至3.59~3.64 g/L,有机质占比下降至65.4%~67.6%。Wang等<sup>[5]</sup>发现,高浓度TCC会降低活性污泥浓度,这与本实验结果一致。TCC具有抗菌特性,可能会直接抑制活性污泥中微生物的生长和代谢活动,导致微生物浓度下降<sup>[13]</sup>。TCC可能会干扰微生物的代谢途径,特别是与能量产生和物质代谢相关的途径,导致微生物生长受阻,进而影响污泥浓度。



a. TSS



b. VSS/TSS

图3 TCC对反硝化污泥浓度及有机质占比的影响

Fig.3 Effect of TCC concentration on denitrification sludge concentration and proportion of organic matter

图4为TCC对反硝化污泥沉降及脱水性能的影响。可知,低浓度TCC未对污泥沉降和脱水性能产生显著影响。在稳定时期,对照组和低浓度TCC组别的SVI和CST分别为65.9~72.5 mL/g和31.3~36.5 s。TCC浓度达到5 mg/L以上时可提高SVI并延长CST,降低污泥的沉降和脱水性能,尤其当TCC为10 mg/L时,稳定时期SVI和CST分别为89.6~

92.5 mL/g 和 45.6~48.5 s。TCC 是一种广谱抗菌剂,会抑制污泥中微生物的生长,这可能导致污泥中的微生物群落结构发生变化,影响其降解能力和稳定性。此外,高浓度 TCC 会影响污泥的黏性和流变特性,从而影响其沉降性能。高浓度 TCC 组别的污泥沉降性能下降,导致部分污泥在沉淀出水期未能完全沉降,进而随排水流失,降低了污泥浓度,这与图 3 中 TSS 的结果相一致。反硝化污泥的后续过程需要脱水外运,高浓度 TCC 的暴露延长了污泥 CST,降低了污泥的脱水性能。TCC 可能会改变污泥的结构和性质,导致污泥颗粒之间的聚集增多,从而增大了污泥的黏性和附着性,提高了污泥比阻和 CST。高浓度 TCC 能促进细胞外电荷的增加,进而导致静电斥力增强,污泥沉降性能下降。

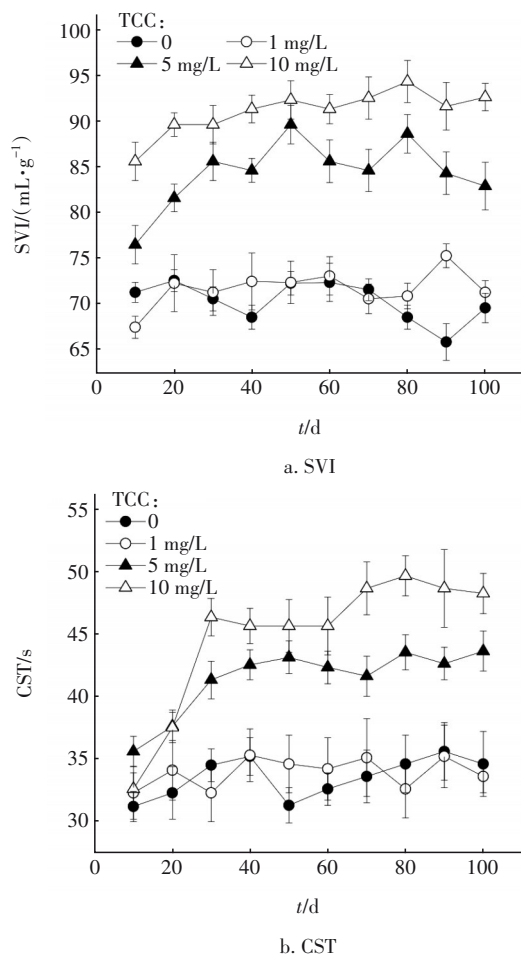
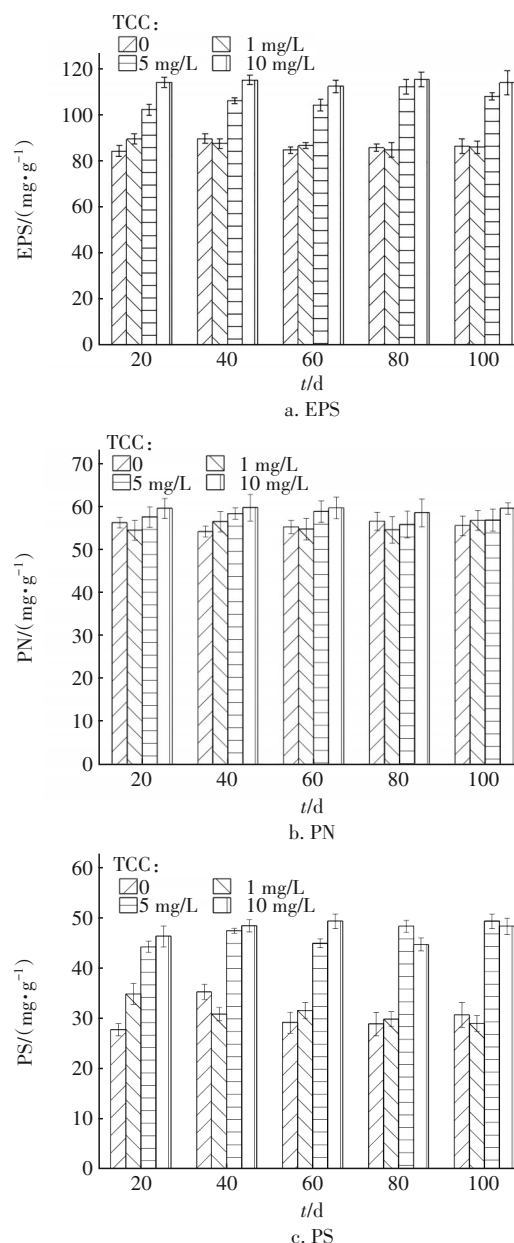


图4 TCC对反硝化污泥沉降及脱水性能的影响

Fig.4 Effect of TCC concentration on sedimentation and dewatering performance of denitrification sludge

EPS对污泥颗粒的黏附和胶结具有重要作用,可影响污泥的结构稳定性和沉降性。TCC会改变

EPS的黏性和稳定性,从而影响污泥结构和沉降性。图5为TCC对生物反硝化污泥中EPS含量及组分的影响。从图5(a)可知,低剂量TCC组别的EPS含量与对照组相似,始终处于84.6~89.5 mg/g之间,而高浓度TCC则提高了EPS含量,尤其当TCC为10 mg/L时,EPS含量增至112.3~115.8 mg/g,远高于其他组别。当污泥系统受到外源性污染物(如重金属、有毒化学物质、有机污染物等)的影响时,微生物会产生应激反应,增加EPS的分泌以形成保护层,减少污染物对细胞的直接伤害。此外,TCC可能会导致细胞膜损伤,微生物通过增加EPS的产生来修复受损的细胞膜,维持细胞结构的完整性。



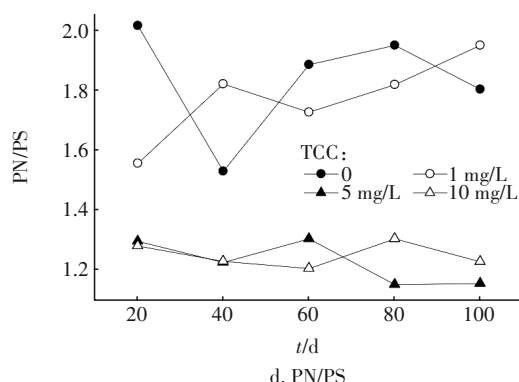


图5 TCC对反硝化污泥中EPS含量及组分的影响

Fig.5 Effect of TCC concentration on EPS content and components in denitrification sludge

EPS的主要组分为PN和PS,TCC同样影响了PN和PS的含量。从图5(b)、(c)可以看出,当TCC浓度为1 mg/L时未对PN和PS含量产生显著影响,但达到5 mg/L以上时,TCC刺激了PN和PS分泌,且呈现出TCC暴露浓度越高PN和PS增加越显著的趋势。当TCC浓度达到10 mg/L时,PN和PS含量分别提高至58.6~61.2 mg/g和46.5~48.2 mg/g。TCC影响了污泥中信号分子的产生和传递,这些信号分子可以调节微生物的代谢活动,包括EPS的合成与分泌。PN/PS值是EPS性能的关键参数,从图5(d)可以看出,稳定时期对照组和低TCC组别的PN/PS值均在1.6以上,而当TCC浓度达到5 mg/L以上时,PN/PS值显著下降至1.2左右,且在稳定期内PN/PS值变化不明显。TCC会影响微生物产生的信号分子,如酰基高丝氨酸内酯(AHLs),这些信号分子通过群体感应(QS)系统调节EPS的合成,进而影响PN和PS的分泌比例<sup>[4]</sup>。

#### 2.4 TCC对氧化应激及细胞膜破坏的影响

图6为TCC对反硝化污泥ROS和LDH相对释放量的影响。可以发现,TCC能引起ROS释放量的增加,且相对释放量与暴露时间相关。20 d时,当TCC浓度为5和10 mg/L时,ROS相对释放量分别提高至105%和115%,LDH相对释放量分别提高至116.5%和118.9%,说明高浓度TCC会导致细胞损伤和死亡。当暴露时间延长至80 d时,高浓度TCC存在下ROS和LDH的相对释放量进一步提高,如当TCC浓度为10 mg/L时,ROS和LDH的相对释放量分别提高至124%和126%。外源性污染物尤其是有毒性污染物能够诱导污泥中的微生物产生ROS,如超氧阴离子、羟基自由基等,这些ROS在微生物

的应激反应和细胞损伤过程中具有重要作用<sup>[14]</sup>。LDH是一种存在于细胞内的酶,当细胞膜受损时,LDH可以从细胞内泄漏到外界环境,且细胞膜破损越严重,LDH释放量越大<sup>[15]</sup>。TCC在反硝化系统内暴露时间越长,对微生物细胞结构的破坏越严重,进而导致微生物反硝化代谢功能下降。

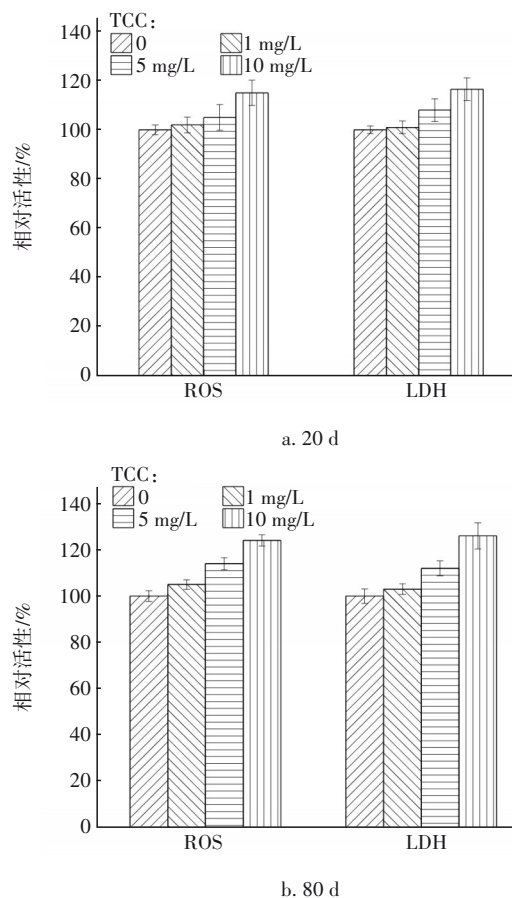


图6 TCC对反硝化污泥ROS和LDH相对释放量的影响

Fig.6 Effect of TCC concentration on relative release of ROS and LDH from denitrification sludge

### 3 结论

① TCC对活性污泥反硝化脱氮性能具有剂量依赖性,当TCC浓度在1 mg/L及以下时,TCC暴露对污水生物脱氮及有机质去除无显著影响。当浓度达到5 mg/L以上时可降低反硝化污泥对COD和TN的去除效果,而当浓度达到10 mg/L时则明显抑制对 $NH_4^+-N$ 的去除效果。TCC浓度越高,对降碳脱氮效果的抑制越显著。

② TCC能影响反硝化污泥特征,TCC达到5 mg/L以上时会降低污泥浓度及有机质占比。TCC可降低污泥沉降及脱水性能,促进EPS的分泌,但会



降低PN/PS值。

③ TCC暴露刺激了反硝化系统内ROS和LDH的释放,影响了微生物代谢活性,且其浓度越高,反硝化系统内ROS和LDH的释放量越大。

#### 参考文献:

- [1] CHENG Z, ZHANG C T, JIANG W Q, *et al.* Effects of the presence of triclocarban on the degradation and migration of co-occurring pesticides in soil [J]. *Environmental Pollution*, 2022, 310: 119840.
- [2] XIE J H, ZHAO N, ZHANG Y Y, *et al.* Occurrence and partitioning of bisphenol analogues, triclocarban, and triclosan in seawater and sediment from East China Sea[J]. *Chemosphere*, 2022, 287: 132218.
- [3] KAJTA M, RZEMIENIEC J, WNUK A, *et al.* Triclocarban impairs autophagy in neuronal cells and disrupts estrogen receptor signaling via hypermethylation of specific genes[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 701: 134818.
- [4] LUCON-XICCATO T, SAVAŞCI B B, MEROLA C, *et al.* Environmentally relevant concentrations of triclocarban affect behaviour, learning, and brain gene expression in fish[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 903: 166717.
- [5] WANG D B, TAO L J, YANG J N, *et al.* Understanding the interaction between triclocarban and denitrifiers[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 401: 123343.
- [6] WANG Y L, TENG Y J, WANG D B, *et al.* The fate of triclocarban in activated sludge and its influence on biological wastewater treatment system [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 276: 111237.
- [7] WANG H, YUN H, LI M H, *et al.* Fate, toxicity and effect of triclocarban on the microbial community in wastewater treatment systems[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 440: 129796.
- [8] HE Y Y, LIU Y R, YAN M H, *et al.* Insights into  $N_2O$  turnovers under polyethylene terephthalate microplastics stress in mainstream biological nitrogen removal process [J]. *Water Research*, 2022, 224: 119037.
- [9] KE Z, WANG S, ZHU W Q, *et al.* Genetic bioaugmentation with triclocarban-catabolic plasmid effectively removes triclocarban from wastewater [J]. *Environmental Research*, 2022, 214: 113921.
- [10] ZHANG L Y, MA X D, LI Q, *et al.* Complementary biotransformation of antimicrobial triclocarban obviously mitigates nitrous oxide emission toward sustainable microbial denitrification [J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57(19): 7490–7502.
- [11] 周晨,潘玉婷,刘敏,等. 反硝化过程中氧化亚氮释放机理研究进展[J]. *化工进展*, 2017, 36(8): 3074–3084.
- ZHOU Chen, PAN Yuting, LIU Min, *et al.* Advance of mechanism on  $N_2O$  emissions from biological denitrification [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2017, 36(8): 3074–3084 (in Chinese).
- [12] 杨丽,何腾霞,张漫漫,等. 好氧反硝化细菌碳氮代谢特点及途径的研究进展[J]. *微生物学报*, 2022, 62(12): 4781–4797.
- YANG Li, HE Tengxia, ZHANG Manman, *et al.* Research progress in the characteristics and pathways of carbon and nitrogen metabolism of aerobic denitrifying bacteria [J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2022, 62(12): 4781–4797 (in Chinese).
- [13] 俞金辉,曾庆玲,沈春花,等. 活性污泥对三氯生的降解特性及其动力学[J]. *环境科学与技术*, 2017, 40(8): 159–163.
- YU Jinhui, ZENG Qingling, SHEN Chunhua, *et al.* Biodegradation characteristics and kinetics of triclosan by activated sludge [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 40(8): 159–163 (in Chinese).
- [14] YU B Z, YAN W, MENG Y J, *et al.* A noteworthy response process of *Microcystis aeruginosa* induced by exogenous reactive oxygen species in algae-laden water treatment [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 476: 146471.
- [15] LI S S, WU S Y, MA B R, *et al.* Insights into the effects of single and combined divalent copper and humic acid on the performance, microbial community and enzymatic activity of activated sludge from sequencing batch reactor [J]. *Chemosphere*, 2020, 249: 126165.

作者简介:孙书荃(1990—),女,河南开封人,博士,讲师,主要研究方向为环境微生物学、污水生物处理。

E-mail:sunsq0721@126.com

收稿日期:2024-07-20

修回日期:2024-09-19

(编辑:任莹莹)