

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.15.012

重金属铊对新型后置缺氧反硝化工艺的影响

孙莉莉¹, 李长福¹, 姚登辉²

(1. 黄河水利职业技术学院 环境工程学院, 河南 开封 475004; 2. 河南广电计量检测有限公司, 河南 郑州 450000)

摘要: 针对重金属铊(Tl)对新型后置缺氧反硝化工艺运行效能影响不明确现状,通过控制进水Tl浓度,在室温下考察了Tl对新型后置缺氧反硝化工艺运行效能的影响,并揭示了相关作用机制。结果表明,即使低浓度Tl(5 $\mu\text{g/L}$)也可降低工艺对污染物和营养盐的去除效果。此外,Tl影响了后置缺氧反硝化工艺中污泥的特征,降低了总悬浮固体(TSS)浓度及VSS/TSS值,刺激了胞外聚合物(EPS)的分泌。胞内聚合物分析表明,Tl抑制了聚羟基脂肪酸酯(PHA)的合成,但促进了糖原质的代谢。微生物群落结构分析表明,高浓度Tl降低了门水平上*Proteobacteria*、属水平上*Chloroplast*和*Devosia*的相对丰度,进而降低了污染物和营养盐的去除效果。

关键词: 重金属Tl; 后置缺氧反硝化; 营养盐去除; 胞外聚合物

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)15-0075-08

Impact of Heavy Metal Thallium on a Novel Post-anoxic Denitrification Process

SUN Li-li¹, LI Chang-fu¹, YAO Deng-hui²

(1. School of Environmental Engineering, Yellow River Conservancy Technical Institute, Kaifeng 475004, China; 2. Henan GRG Metrology & Test Co. Ltd., Zhengzhou 450000, China)

Abstract: In light of the ambiguous impact of thallium (Tl) on the operational performance of a novel post-anoxic denitrification process, an investigation into the influence of Tl on the novel post-anoxic denitrification process at room temperature was conducted by regulating the influent Tl concentration, and the underlying mechanism was elucidated. Even the low concentration of Tl (5 $\mu\text{g/L}$) hindered the effective removal of pollutants and nutrients in the process. Furthermore, Tl influenced the sludge characteristics in the post-anoxic denitrification process, decreased total suspended solids (TSS) concentration and VSS/TSS ratio, and promoted the secretion of extracellular polymeric substances (EPS). The intracellular polymeric substances analysis revealed that Tl decreased the concentration of polyhydroxyalkanoate (PHA), but enhanced the metabolism of glycogen. The analysis of microbial community composition revealed that a high concentration of Tl led to a decrease in the relative abundance of *Proteobacteria* at the phylum level, and the relative abundance of *Chloroplast* and *Devosia* at the genus level, consequently diminishing the removal efficiency of pollutants and nutrients.

Key words: heavy metal Tl; post-anoxic denitrification; nutrient removal; EPS

新型后置缺氧反硝化工艺因运行操作简单、费用低等优势成为去除污水中营养盐的有效技术^[1]。

基金项目: 河南省重大科技专项(221100320200)

通信作者: 孙莉莉 E-mail: hhsy_sunlili0591@163.com

该工艺的运行效率受操作条件、原水水质特征等因素的影响。之前的研究多集中于操作条件对新型后置缺氧反硝化工艺的影响,而对于水质特征影响的研究较少^[2-3]。

污水中携带的重金属会影响污染物及营养盐的转化,并直接影响微生物代谢及关键酶活性,从而影响出水水质。铊(Tl)是地球上广泛分布的剧毒重金属,被美国环保署和欧洲水框架组织列为优先污染物之一。Tl在电子、半导体、制药等领域具有广泛的用途,但Tl的大量使用也导致相关污染事件频发^[4]。水体中Tl主要以两种价态(I价和III价)存在,相较于Tl(I),Tl(III)对小球藻和大水蚤的毒性更强^[5]。但稳定的Tl(I)被认为是大多数天然氧化水体中Tl的主要存在形式^[6]。目前,关于Tl毒性的研究对象多集中于鱼类、藻类和无脊椎动物等^[7-8],而对于活性污泥效应及其作用机制的探究相对较少。鉴于此,笔者考察了Tl对后置缺氧反硝化工艺运行效能的影响,分析了Tl暴露条件下营养盐的周期性转化规律,解析了Tl对污泥特征的影响,最后通过16S rRNA高通量测序,从微生物群落结构角度揭示了Tl对后置缺氧反硝化工艺的影响机制,旨在为降低Tl对污水生物处理的危害以及减少Tl在污水中迁移转化风险提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验所用废水为人工合成废水,按照某矿业废水成分配制并略有改动。具体水质如下:pH为6.9,COD为(412±12) mg/L,BOD₅为(208±12) mg/L,TN为(68±3.2) mg/L,NH₄⁺-N为(45±2.9) mg/L,PO₄³⁻-P为(8.5±1.3) mg/L。实验所用碳源为乙酸钠和丙酸钠混合碳源(两者质量比为1:1),氮源为氯化铵,磷源为磷酸二氢钾。

接种污泥来源于某污水处理厂二沉池,取回后的剩余污泥经人工去除杂质后在实验室静置24 h,弃掉上清液。接种污泥的主要特征如下:总悬浮固体(TSS)为(5.6±0.5) g/L,挥发性悬浮固体(VSS)为(4.9±0.3) g/L,污泥体积指数(SVI)为(92.3±5.2) mL/g,COD去除率高达90%以上。

反应器为玻璃树脂制成的圆柱形反应器,有效工作容积为6.0 L,底部半径和高分别为8.5和28 cm,径高比为0.3。距离底部5.0 cm处设有直径为

2.0 cm的进水口,侧面距离顶部5.0 cm处设有直径为2.0 cm的出水口。SBR底部设有微孔曝气盘,通过转子流量计控制气体流量以保证好氧阶段的溶解氧浓度维持在3.0~5.0 mg/L。将10.0 mg TlCl溶于35℃的1.0 L纯净水内,制成母液,将Tl母液置于棕色锥形瓶内进行避光保存。

1.2 实验方法

在5套相同的反应器内进行实验,每套反应器含有3个相同的SBR。首先,各SBR引入3.0 L接种物和3.0 L合成废水,然后向各组反应器内加入不同体积的Tl母液,控制其浓度分别为0、5、25、50和100 μg/L(分别为R0、R1、R2、R3、R4)。新型后置缺氧工艺每日运行3个周期,每个周期的运行模式如下:90 min厌氧,120 min好氧,90 min缺氧,30 min沉淀出水,150 min闲置^[9]。每个周期排水,以控制水力停留时间为12 h;每日在固定周期好氧阶段排出泥水混合物133 mL以控制污泥停留时间为15 d。Tl母液每日只在一个周期投加一次,另外两个周期进水不含Tl母液。定期测定出水水质,并结合污泥特征来判断Tl对工艺的影响。实验在25~35℃的室温环境下进行。在80 d时,测定污泥内关键酶活性及微生物群落结构,以揭示新型后置缺氧工艺对Tl的响应机制。

1.3 分析项目及方法

COD、溶解性磷酸盐(SOP)、TN及SVI的测定参照《水和废水监测分析方法》(第4版);TSS和VSS采用重量法测定。聚羟基脂肪酸酯(PHA)采用气相色谱法测定,具体步骤如下^[10]:取10 mL新鲜的颗粒污泥样品置于离心管中高速离心,去除上清液,将剩余固体置于-80℃中冷藏24 h后放入冷冻干燥机中24 h;用电子天平称量冷干后的样品,取约10 mg干燥的颗粒污泥于消解管中,加入2 mL氯仿、2 mL酸化甲醇溶液,在105℃烘箱中消解6 h后进行水解酯化反应;进行气相色谱测定时,进样口温度为200℃,载气为N₂,压强为71.2 kPa,流量为41.4 mL/min,分流比为25/1,柱箱初始温度为70℃,保持1 min后以10℃/min上升到140℃,保持2 min。EPS采用离子交换树脂法提取,EPS内蛋白质(PN)和多糖(PS)分别采用福林酚法和蒽酮比色法测定,并分别用牛血清白蛋白和葡萄糖作为标准对照物。糖原质采用蒽酮比色法测定。细胞内活性氧(ROS)、过氧化氢酶(CAT)和超氧化物歧化酶(SOD)的分析

见文献[11]。

微生物测序:待各组别运行稳定后,取50 mL污泥样品于-80℃条件下保存,样品送往上海美吉生物医药科技有限公司进行微生物群落结构测定。采用341F(5'-CCTACGGGNGGCWGCAG-3')和785R(5'-GACTACHVGGGTATCTAATCC-3')作为扩增引物进行PCR扩增后,样品于Illumina NovaSeq 6000测序平台进行高通量测序。

2 结果与讨论

2.1 Tl对出水水质的影响

图1为Tl对新型后置缺氧工艺出水COD的影响。

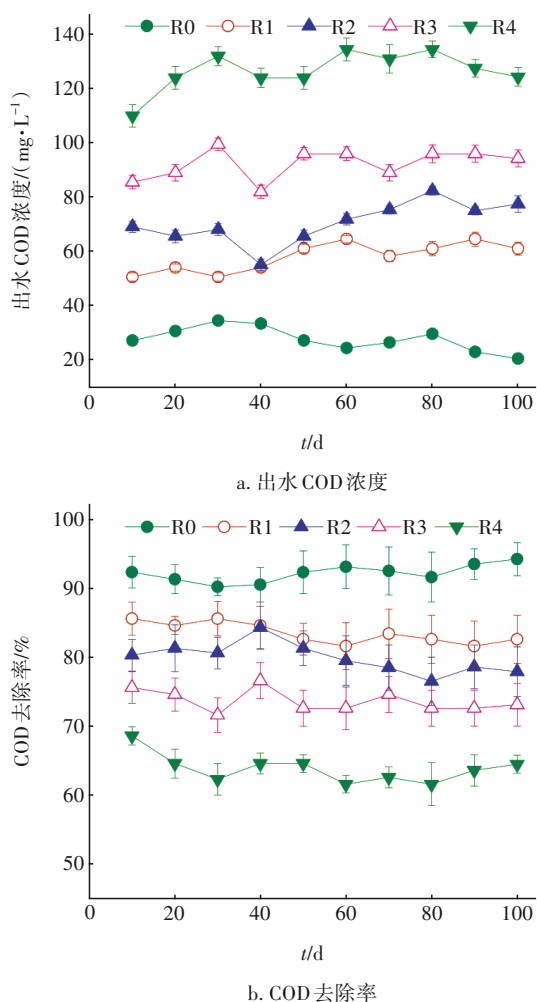


图1 Tl对后置缺氧工艺出水COD的影响

Fig.1 Effect of Tl on effluent COD in post-anoxic process

从图1可以看出,Tl显著影响了对COD的去除效果。稳定期,空白组出水COD浓度维持在22.7~27.4 mg/L,COD去除率高达91.6%~93.1%,说明新型后置缺氧反硝化工艺能有效去除污染物。但当

存在Tl时,出水COD浓度显著升高,COD去除率明显下降。当Tl浓度由5 μg/L升高至100 μg/L时,稳定期出水COD浓度由58.1~64.4 mg/L升高至124.5~134.8 mg/L,相应的COD去除率由81.2%~84.6%下降至61.6%~64.3%。上述结果表明,Tl能抑制后置缺氧工艺对污染物的去除效果,且Tl浓度越高,对去除COD的抑制效果越显著。赵晓静等^[11]在SBR内探究Tl对COD去除率的影响发现,Tl能显著抑制对污染物的去除效果,且移除Tl暴露后,COD去除率得以恢复。Tl的毒性高于Hg、Cu、Cd,本研究证实即使存在低浓度的Tl(5 μg/L),长期暴露同样能抑制活性污泥系统去除污染物的效果。因此,在发生Tl暴露事件中应注意其对污水处理效果的影响。

Tl对新型后置缺氧工艺去除营养盐的影响如图2所示。

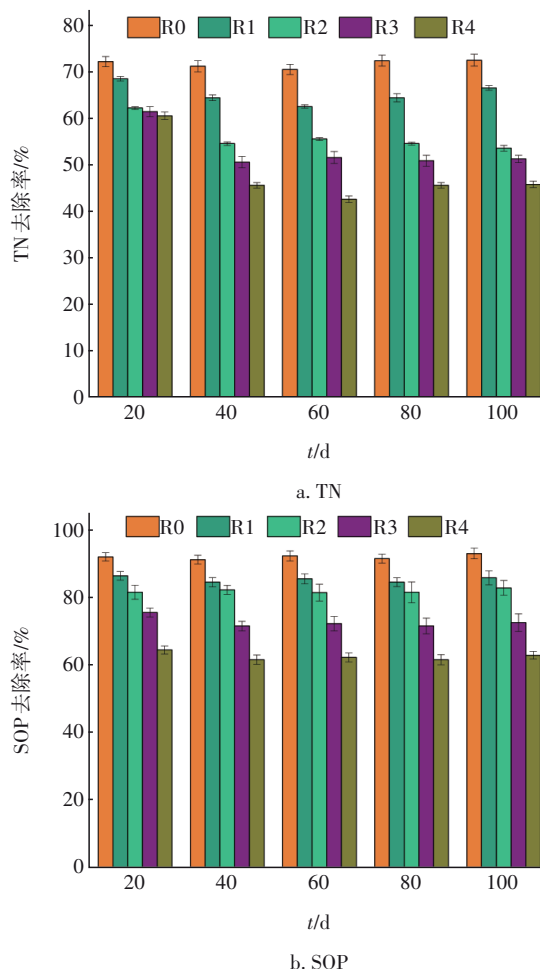


图2 Tl对后置缺氧工艺去除营养盐的影响

Fig.2 Effect of Tl on nutrient removal in post-anoxic process

从图2可知,TI显著影响了对TN和SOP的去除效果,且TI浓度越高,营养盐去除率下降越显著。在TN去除方面,20 d后,当TI的浓度由5 $\mu\text{g/L}$ 增加至100 $\mu\text{g/L}$ 时,TN去除率由64.5%~66.8%下降至42.6%~45.8%。对TN的去除主要依赖微生物同化及反硝化菌的反硝化过程。一方面,高浓度TI能降低活性污泥中有机质浓度,进而导致微生物同化消耗TN的能力受到抑制;另一方面,TI的毒性抑制了反硝化微生物的代谢,从而导致生物脱氮过程被抑制^[12]。

在SOP去除方面,即使在长期暴露中,低浓度TI也显著抑制了对SOP的去除。稳定时期,当TI浓度由5 $\mu\text{g/L}$ 增加至100 $\mu\text{g/L}$ 时,SOP去除率由84.6%~86.9%下降至61.6%~64.5%。上述实验结果证实,TI可以显著抑制新型后置缺氧工艺内SOP的去除效果。聚磷微生物(PAO)代谢易受到重金属的干扰,TI的毒性能抑制PAO活性,从而降低对SOP的去除效果。

2.2 TI对后置缺氧工艺内污泥特征的影响

TSS及VSS/TSS是表征污泥特性的两个重要指标,TI对TSS及VSS/TSS的影响如图3所示。可见,空白组的TSS浓度维持在较高水平(4.19~4.25 g/L)。但当存在TI时,TSS浓度受到显著影响,且TI对TSS的影响与TI浓度密切相关。当TI浓度由5 $\mu\text{g/L}$ 增加至100 $\mu\text{g/L}$ 时,稳定运行期间TSS浓度由4.02~4.09 g/L下降至3.18~3.36 g/L。TI的毒性能抑制微生物的增殖,从而降低了TSS浓度。TI暴露组TSS下降也证实TI抑制了微生物增殖,降低了微生物同化作用对TN和SOP的消耗,这也是导致高浓度TI抑制后置缺氧工艺内营养盐去除的原因之一。

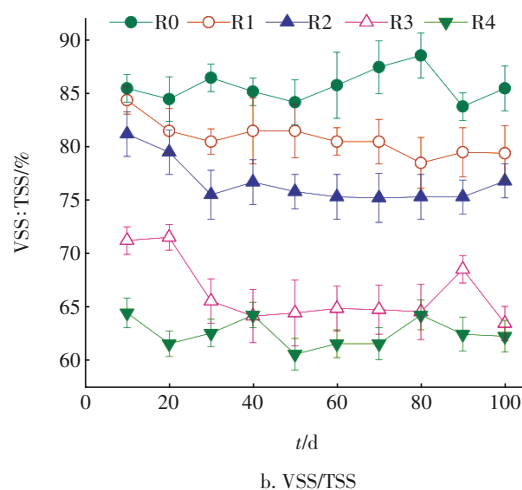
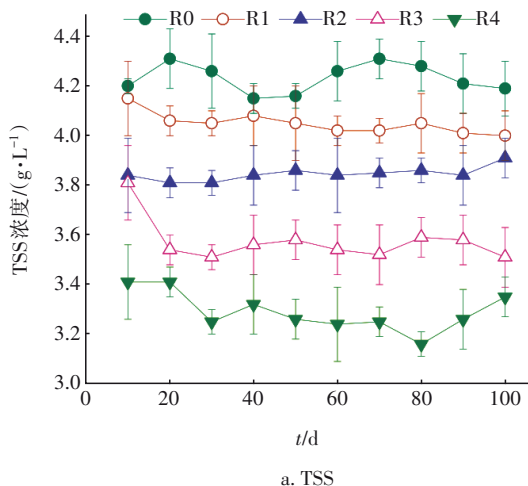


图3 TI对后置缺氧工艺TSS及VSS/TSS的影响

Fig.3 Effect of TI on TSS and VSS/TSS in post-anoxic process

从图3(b)可以看出,与TI对TSS的影响大致相似,TI同样降低了VSS/TSS。当TI浓度由5 $\mu\text{g/L}$ 增加至100 $\mu\text{g/L}$ 时,稳定运行期间VSS/TSS由79.5%~81.6%下降至62.3%~64.2%。TI存在的组别内,其VSS/TSS显著低于空白组,说明TI降低了污泥中有机质的占比。一方面,TI的毒性抑制了微生物增殖,从而导致VSS浓度及占比下降;另一方面,TI会导致污泥沉降性能下降(见图4),致使部分污泥在沉淀/排水期未能完全沉降,从而引起部分VSS随排水流失,降低了VSS浓度及其在TSS中的占比。

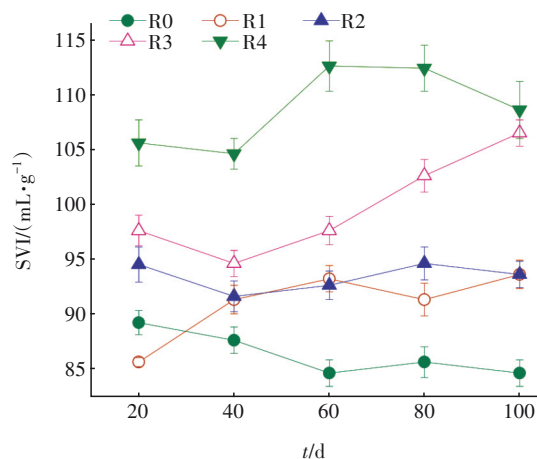


图4 TI对后置缺氧工艺SVI的影响

Fig.4 Effect of TI on SVI in post-anoxic process

从图4可以发现,空白组的SVI维持在84.6~89.2 mL/g,污泥沉降性良好,且运行期间基本保持稳定。但存在TI时,SVI出现不同程度的升高,且升高幅度与TI浓度密切相关。当TI浓度为5和25 $\mu\text{g/L}$

L时,稳定期间SVI为91.3~94.6 mL/g,两者相差不明显。但当Tl浓度超过50 $\mu\text{g/L}$ 时,SVI显著升高,且当浓度为100 $\mu\text{g/L}$ 时,SVI提升至112.6 mL/g,略有污泥膨胀趋势。研究证实^[13],活性污泥膨胀多数是由丝状菌过度增殖引起的,相较于其他细菌,丝状菌对外源重金属具有更强的耐受性,向活性污泥系统中投加阳离子重金属(Cu^{2+} 、 Fe^{3+})有利于好氧颗粒污泥的形成,提高污泥的沉降性。阳离子重金属能提高污泥分泌PN,提高污泥沉降性,而本研究则证实,即使低浓度Tl同样提高了SVI值,降低了污泥的沉降性^[14-15]。Tl的毒性促使污泥分泌EPS尤其是PS,污泥外侧带有相同类型的电荷增加了排斥力,降低了污泥的沉降性。

EPS是微生物自发聚集形成的高分子聚合物,是活性污泥的重要组成部分。外源性Tl同样会影响EPS的含量及组成。图5为Tl对后置缺氧工艺EPS含量及组分的影响。

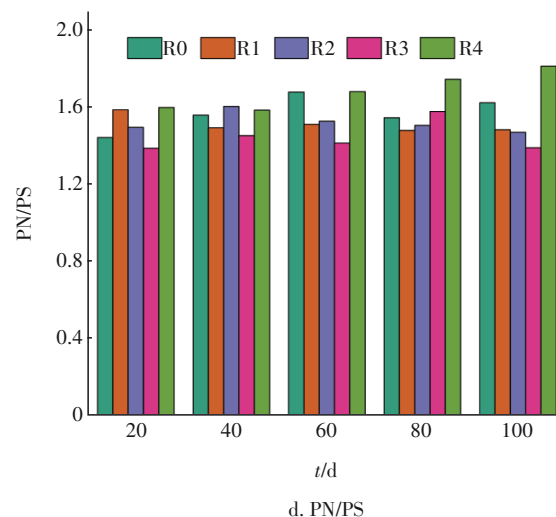
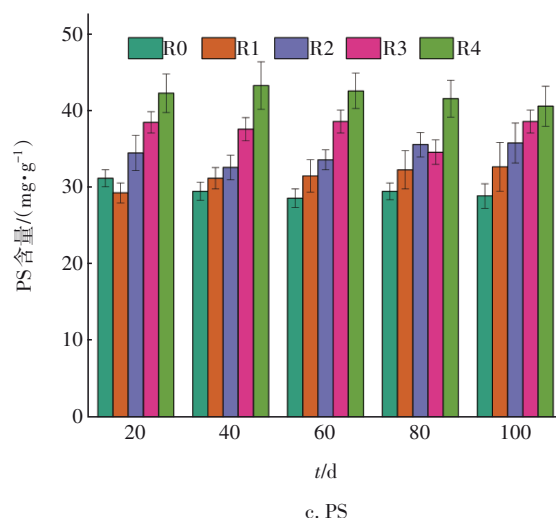
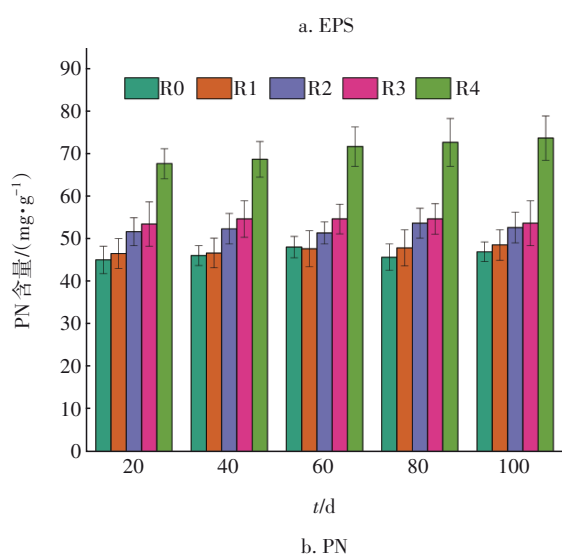
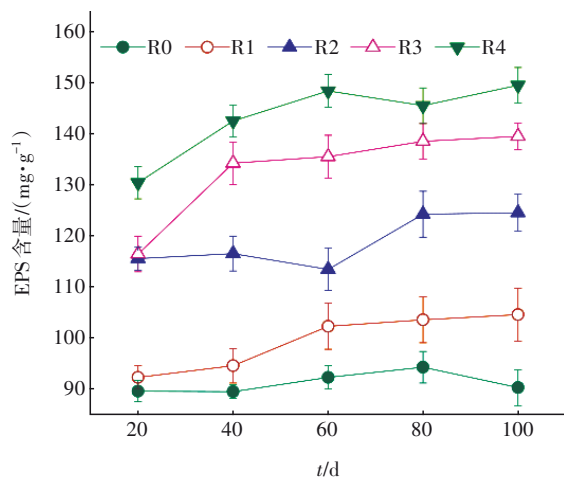


图5 Tl对后置缺氧工艺EPS含量及组分的影响

Fig.5 Effect of Tl on EPS content and components in post-anoxic process

由图5(a)可知,空白组EPS含量为89.5~94.3 mg/g。而Tl的存在提高了EPS含量,且Tl的暴露浓度越高,EPS增加越显著。当Tl浓度为100 $\mu\text{g/L}$ 时,稳定运行期间EPS含量升至145.6~149.8 mg/g,远高于其他组别。有研究证实^[16],当微生物受到外源刺激时会分泌大量EPS进行自我防御,这也是导致各组EPS含量升高的原因。EPS的主要成分为PN和PS,从图5(b)、(c)可以发现,Tl同步提高了PN和PS的含量。在污泥系统中,适量外源性金属离子容易刺激PS含量的增加,进而提高污泥沉降性。进一步研究发现,相比于PS,Tl暴露组别内PN含量增加更显著,见图5(d)。例如,在Tl浓度为100 $\mu\text{g/L}$ 的条件下,100 d时PN/PS升高至1.81,远高于空白组的1.62,其他含Tl的组别类似。上述实验结果表

明,TI促进了PN和PS含量的增加,并提高了PN/PS值。

2.3 TI对微生物代谢活性的影响

ROS、CAT和SOD对TI的响应特征如图6所示。可以发现,上述关键酶相对活性的变化同样与TI的浓度密切相关。当TI的暴露浓度低于5 $\mu\text{g/L}$ 时,上述三种酶的变化可以忽略不计,说明低浓度TI未影响关键酶的相对活性。低浓度TI引起污染物和营养盐去除率下降的原因可归咎于TI对功能微生物代谢的影响。然而当TI暴露浓度超过25 $\mu\text{g/L}$ 时,ROS活性显著升高,并伴随着CAT和SOD的活性下降。尤其当TI浓度为100 $\mu\text{g/L}$ 时,ROS相对活性升高至185%,而CAT和SOD的相对活性下降至52%和60%。暴露于低浓度TI的组别,微生物自身裂解产生ROS可通过CAT和SOD进行移除。研究证实,过高浓度的ROS容易导致细胞凋亡,从而降低微生物代谢活性^[11]。污泥内微生物为适应TI胁迫而产生大量ROS,低剂量TI时活性污泥产生的ROS能很快被CAT和SOD消除,而高剂量TI胁迫产生的ROS进一步验证了微生物代谢活性下降。

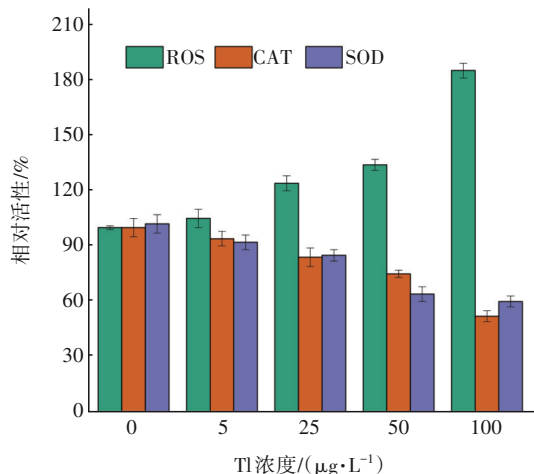


图6 TI对关键酶相对活性的影响

Fig.6 Effect of TI on relative activity of key enzymes

2.4 TI对后置缺氧工艺胞内聚合物产量的影响

PHA和糖原质是活性污泥系统内重要的胞内聚合物,TI暴露会影响PHA和糖原质的含量,结果如图7所示。可知,当TI低于5 $\mu\text{g/L}$ 时,对PHA无明显影响,说明活性污泥内微生物为适应低浓度TI,胁迫强化PHA代谢以维持细胞正常水平。然而TI超过25 $\mu\text{g/L}$ 时则显著降低了PHA的生物合成,且TI的暴露浓度越高,PHA合成受抑制越显著。当

TI暴露浓度由25 $\mu\text{g/L}$ 提高至100 $\mu\text{g/L}$ 时,PHA的最大合成量由5.48 mmol/g下降至5.01 mmol/g。高浓度TI抑制了PHA的合成。PHA在后置缺氧工艺中发挥着重要作用,能在好氧期分解产能用于好氧吸磷,同时可以作为电子供体在缺氧期进行反硝化脱氮。高浓度TI降低了PHA的合成,进而影响了生物脱氮除磷效率。

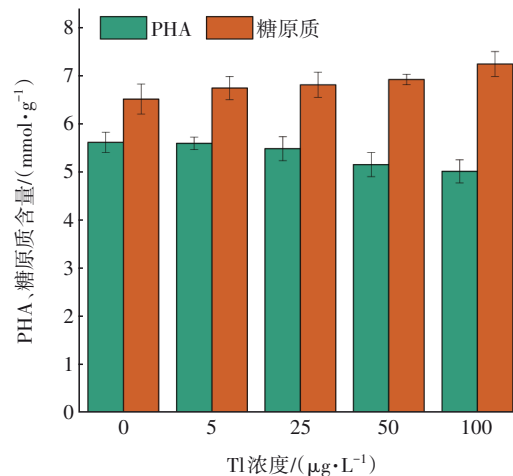


图7 TI对后置缺氧工艺PHA和糖原质含量的影响

Fig.7 Effect of TI on PHA and glycogen content in post-anoxic process

糖原质是活性污泥中重要的胞内聚合物,其代谢变化与活性污泥中聚糖微生物密切相关。聚糖菌(GAO)是一类对除磷无贡献但能与PAO竞争有限碳源的微生物。GAO富集容易消耗废水中的有限碳源,进而降低生物脱氮除磷效果。本研究发现TI提高了糖原质的代谢,即使在低浓度TI下,糖原质的最大含量升高至6.74 mmol/g,高于空白组的6.51 mmol/g。进一步提高TI浓度至100 $\mu\text{g/L}$ 时,糖原质含量增加至7.24 mmol/g。糖原质代谢旺盛反映活性污泥系统中GAO丰度较高,进而不利于污染物和营养盐的去除,这与前述结果一致。

2.5 TI对微生物群落结构的影响

后置缺氧工艺中污染物和营养盐的去除需要多种微生物共同驱动完成,TI暴露会影响活性污泥系统中微生物的群落结构,如图8所示。从图8(a)可知,在门水平上,Cyanobacteria、Proteobacteria和Actinobacteriota是各组中的优势微生物,三者占比之和超过48.1%。TI会影响微生物在门水平上的相对丰度,对于空白组和低浓度TI组别,Proteobacteria的相对丰度高达13.5%~14.6%,而在超过25 $\mu\text{g/L}$ 的

TI暴露组别,其相对丰度下降至10.9%~12.6%,而且TI的浓度越高,*Proteobacteria*的相对丰度下降越显著。有研究证实,*Proteobacteria*是一类能进行生物脱氮的微生物,其还能有效利用废水中的碳源^[13]。*Proteobacteria*相对丰度的下降在一定程度上降低了后置缺氧反硝化工艺对污染物的去除效果和生物脱氮性能。*Firmicutes*是一类厌氧微生物,其含有多种去除污染物的微生物。高浓度TI组别内*Firmicutes*的相对丰度下降至7.5%,低于空白组的8.9%。

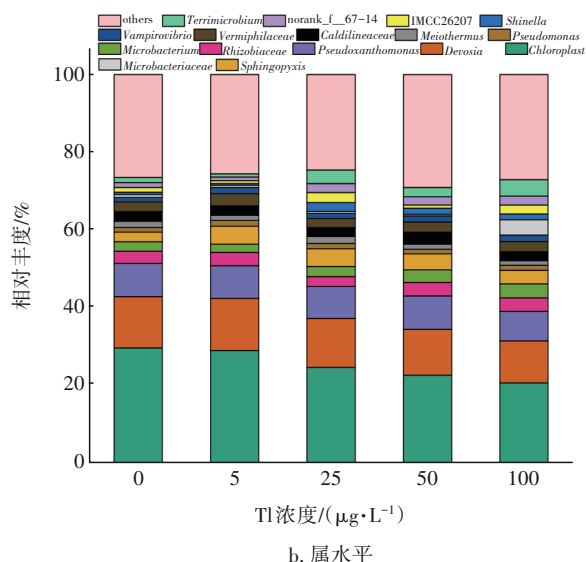
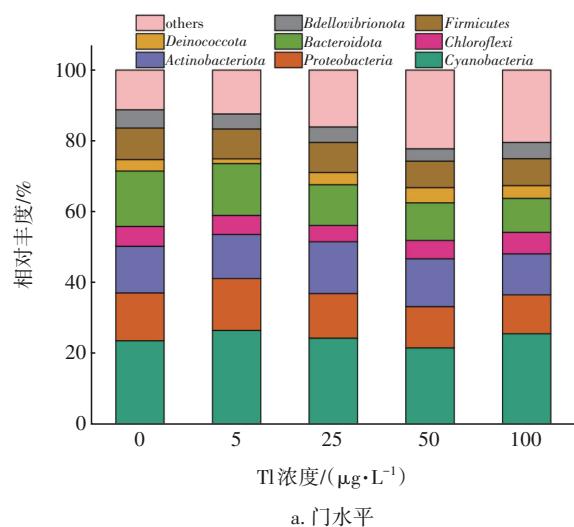


图8 TI对微生物在门水平和属水平相对丰度的影响

Fig.8 Effect of TI on relative abundance of microorganisms at phylum and genus levels

在反应器中近18种属水平的微生物被发现,且相对丰度占比较高。由图8(b)可知,TI同样能影响微生物在属水平上的分布。空白组和低剂量TI组

别内*Chloroplast*的相对丰度高达28.9%~29.6%,超过50 µg/L的组别,*Chloroplast*的相对丰度下降至20.2%~22.6%。*Chloroplast*属于蓝藻细菌,能有效利用外源污染物进行代谢^[17]。高浓度TI降低了*Chloroplast*的相对丰度,这与其抑制COD去除相关。*Devosia*含有反硝化功能基因如*nirS2*、*narG*、*hzsB*、*nirK1*和*nirK2*,从而对生物脱氮具有重要意义^[18]。高浓度TI同样降低了*Devosia*的相对丰度,尤其是100 µg/L的组别,*Devosia*的相对丰度下降至10.8%。高浓度TI能改变微生物在属水平上的相对丰度,从而影响后置缺氧工艺的运行效能。

3 结论

重金属TI能抑制后置缺氧工艺对污染物和营养盐的去除,且TI暴露浓度越高,抑制污染物和营养盐去除的效果越显著。重金属TI能影响后置缺氧工艺中污泥的特征,降低TSS浓度及VSS/TSS值,刺激EPS合成,并提高PN和PS含量。但高浓度TI抑制了内聚物PHA的合成并促进了糖原质代谢。超过25 µg/L的TI抑制了ROS、CAT和SOD等关键代谢酶的活性,并降低了门水平的*Proteobacteria*以及属水平上*Chloroplast*、*Devosia*微生物的相对丰度。

参考文献:

- [1] GAO X J, XUE X F, LI L Y, *et al.* Balance nitrogen and phosphorus efficient removal under carbon limitation in pilot-scale demonstration of a novel anaerobic/aerobic/anoxic process [J]. *Water Research*, 2022, 223: 118991.
- [2] DENG L Y, PENG Y Z, LI J W, *et al.* Enhanced simultaneous nitrogen and phosphorus removal from low COD/TIN domestic wastewater through nitrification-denitrification coupling improved anammox process with an optimal anaerobic/oxic/anoxic strategy [J]. *Bioresource Technology*, 2021, 322: 124526.
- [3] RAJPAL A, BHATIA A, TOMAR N, *et al.* Insight into a novel post-anoxic integrated biofilm process for wastewater treatment and reclamation [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2022, 49: 102957.
- [4] ZHONG Q H, QI J Y, LIU J, *et al.* Thallium isotopic compositions as tracers in environmental studies: a review [J]. *Environment International*, 2022, 162: 107148.
- [5] BELZILE N, CHEN Y W. Thallium in the

- environment; a critical review focused on natural waters, soils, sediments and airborne particles [J]. *Applied Geochemistry*, 2017, 84: 218–243.
- [6] WEI X R, LI X, LIU P, *et al.* Integrated physiological, biochemical, and transcriptomic analysis of thallium toxicity in zebrafish (*Danio rerio*) larvae[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 859: 160265.
- [7] JOHNPAUL A A, AYODEJI L T, TANGFU X, *et al.* Toxicity, uptake, potential ecological and health risks of Thallium (Tl) in environmental media around selected artisanal mining sites in Nigeria [J]. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 2022, 102(17): 5391–5412.
- [8] KOLESNIKOV S, MINNIKOVA T, MINKINA T, *et al.* Toxic effects of thallium on biological indicators of Haplic Chernozem health: a case study [J]. *Environments*, 2021, 8(11): 119.
- [9] HOW S W, CHUA A S M, NGOH G C, *et al.* Enhanced nitrogen removal in an anoxic-oxic-anoxic process treating low COD/N tropical wastewater: low-dissolved oxygen nitrification and utilization of slowly-biodegradable COD for denitrification[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 693: 133526
- [10] PORRAS M A, VILLAR M A, CUBITTO M A. Novel spectrophotometric technique for rapid determination of extractable PHA using Sudan black dye[J]. *Journal of Biotechnology*, 2017, 255: 28–32.
- [11] 赵晓静, 罗远玲, 吴红辉, 等. 铊短期暴露对SBR活性污泥性能的影响[J]. *中国环境科学*, 2023. DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20231211.005.
- ZHAO Xiaojing, LUO Yuanling, WU Honghui, *et al.* Effect of short-term exposure to thallium on SBR activated sludge performance [J]. *China Environmental Science*, 2023. DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20231211.005(in Chinese).
- [12] CHAUHAN R, SRIVASTAVA V C. Electrochemical denitrification of highly contaminated actual nitrate wastewater by Ti/RuO₂ anode and iron cathode [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 386: 122065.
- [13] HASAN M, ALFREDO K, MURTHY S, *et al.* Biodegradation of salicylic acid, acetaminophen and ibuprofen by bacteria collected from a full-scale drinking water biofilter [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 295: 113071.
- [14] JIANG Y, LIU Y, ZHANG H N, *et al.* Aerobic granular sludge shows enhanced resistances to the long-term toxicity of Cu (II) [J]. *Chemosphere*, 2020, 253: 126664.
- [15] LIU X Y, LIU J, DENG D K, *et al.* Investigation of extracellular polymeric substances (EPS) in four types of sludge: factors influencing EPS properties and sludge granulation [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2021, 40: 101924.
- [16] LIAN Z Y, YANG Z Y, SONG W F, *et al.* Effects of different exogenous cadmium compounds on the chemical composition and adsorption properties of two gram-negative bacterial EPS [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 806: 150511.
- [17] HU X G, REN C X, KANG W L, *et al.* Characterization and toxicity of nanoscale fragments in wastewater treatment plant effluent [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 626: 1332–1341.
- [18] TAGG A S, SPERLEA T, LABRENZ M, *et al.* Year-long microbial succession on microplastics in wastewater: chaotic dynamics outweigh preferential growth [J]. *Microorganisms*, 2022, 10(9): 1775.

作者简介: 孙莉莉(1984–), 女, 河南开封人, 硕士, 讲师, 主要研究方向为环境工程及监测、环境毒理学。

E-mail: hhsy_sunlili0591@163.com

收稿日期: 2024-01-12

修回日期: 2024-03-28

(编辑: 任莹莹)