

# 典型抗生素甲氧苄啶影响下 缺氧反硝化脱氮除碳效能的研究

李云琴\*, 曾悦

(福州大学环境与安全工程学院, 福建 福州 350108)

**摘要:**以实际废水和活性污泥为研究对象,通过构建的序批式好氧-缺氧反应器探究不同质量浓度抗生素甲氧苄啶(TMP)对硝化与反硝化过程的影响。结果表明,低质量浓度(如1.0 mg/L)TMP对除碳、脱氮过程无明显影响,而TMP质量浓度超过2.0 mg/L时,降低了碳源消耗及脱氮性能。当进水TMP质量浓度为8.0 mg/L时,稳定时期COD和NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N去除率分别为71.6%~76.5%和75.6%~76.2%,远低于对照组。高质量浓度TMP降低了NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N氧化、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N氧化及NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N反硝化,提高了NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N的积累并且积累量高达6.5 mg/L,远高于对照组。低质量浓度TMP对硝酸盐还原酶(NAR)的影响不明显。

**关键词:**甲氧苄啶;好氧-缺氧反应器;硝化;反硝化;酶活性

中图分类号:TQ028.8

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2022)09-0129-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2022.09.026

## Study on nitrogen and carbon removal efficiency of anoxic denitrification under influence of trimethoprim

LI Yun-qin\*, ZENG Yue

(College of Environment & Safety Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

**Abstract:** Taking actual wastewater and activated sludge as the research objects, the effects of trimethoprim (TMP) with different mass concentrations on the nitrification and denitrification processes are investigated by constructing a sequencing batch aerobic anoxic reactor. It is found that TMP with a low mass concentration (such as 1.0 mg·L<sup>-1</sup>) has no significant impact on the process of carbon and nitrogen removal, while TMP with a concentration more than 2.0 mg·L<sup>-1</sup> can reduce the consumption of carbon source and the performance in removing nitrogen. When the mass concentration of TMP in influent is 8.0 mg·L<sup>-1</sup>, the removal efficiencies of COD and NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N in the stable period are 71.6%~76.5% and 75.6%~76.2%, respectively, far lower than that of the control group. High mass concentration of TMP reduces NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N oxidation, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N oxidation and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N denitrification, and increases the accumulation of NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N, which is as high as 6.5 mg·L<sup>-1</sup>, much higher than that in the control group. Low mass concentration of TMP has not obvious impact on nitrates reductase (NAR).

**Key words:** trimethoprim; aerobic anoxic reactor; nitrification; denitrification; enzymatic activity

甲氧苄啶(TMP)是一种常见的含氮类抗生素,在临床上常用作增强剂以加强抗药性,TMP在水体中常与其他含氮类污染物共存。2012年,我国TMP的年产量高达2500 t,并且呈逐年上升趋势<sup>[1]</sup>。在废水处理过程中,硝化与反硝化是2个关键步骤。杨腾飞等<sup>[2]</sup>考察了磺胺甲噁唑和TMP对污水处理的影响,发现2种抗生素的联用对生物脱氮具有明显抑制效应。传统活性污泥法对TMP的去除主要以吸附作用为主,并不能有效实现TMP生物降解。陈炳伟等<sup>[3]</sup>考察了TMP对好氧活性污泥硝化过程

的长期影响,结果表明,TMP对氨氮去除具有显著抑制作用。全过程脱氮受多种因素影响,外界新兴污染物存在会干扰硝化与反硝化过程。目前,关于TMP对污水硝化-反硝化过程的影响研究较少,且TMP暴露对反硝化过程关键酶活性的影响也不明确。

因此,笔者以TMP和活性污泥为探究对象,构建了SBR硝化反硝化序批式脱氮反应器,探究了TMP对生物脱氮过程的影响,并从脱氮性能、典型周期内营养盐的变化及反硝化酶活性揭示TMP对

收稿日期:2021-09-15;修回日期:2022-07-04

基金项目:国家自然科学基金(41807116);福建省自然科学基金(2018J01745);福州大学测试基金(2021T013)

作者简介:李云琴(1977-),女,硕士,实验师,主要研究方向为环境工程水处理,通讯联系人,qinyun405@163.com

生物脱氮的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

TMP (CAS 738-70-5), 纯度高于 99%, 分子式为  $C_{14}H_{18}N_4O_3$ , 上海阿拉丁生化科技股份有限公司生产。

活性污泥: 取自福州某污水处理厂二次沉淀池, 取回后的接种污泥经过 1.0 cm 筛网去掉大颗粒杂质后备用, 接种物具有良好的脱氮性能,  $NH_4^+-N$  去除效率高达 90% 以上。接种污泥的主要特征如表 1 所示。

表 1 接种污泥主要特征参数

pH	TSS/ ( $mg \cdot L^{-1}$ )	VSS/ ( $mg \cdot L^{-1}$ )	$NH_4^+-N$ / ( $mg \cdot L^{-1}$ )	$PO_4^{3-}-P$ / ( $mg \cdot L^{-1}$ )
6.9±0.2	6500±160	4500±130	16.5±2.1	3.5±0.2

注: 表中数据为 3 次测定的平均值±标准偏差。

实验用水: 实验用水取自某大学家属院排水蓄水池, 取回后的废水经过滤掉大颗粒杂质后备用, 经测定实验废水中 TMP 的质量浓度低于检测线。实验废水的主要特征参数如下: COD 240~320 mg/L,  $NH_4^+-N$  35~42 mg/L,  $NO_2^- -N$  和  $NO_3^- -N$  质量浓度均低于 0.3 mg/L。

### 1.2 实验设置

在 5 个相同的序批式活性污泥工艺 (SBR) (工作容积为 2.0 L) 内分别接种 0.8 L 经驯化的接种污泥, 并控制污泥质量浓度约为 4 500 mg/L。SBR 每日运行 4 个周期, 每个周期包含 90 min 好氧曝气、150 min 缺氧、30 min 沉淀/出水和 90 min 闲置期。曝气阶段采用鼓风曝气, 溶解氧控制在 3.0~4.0 mg/L, 其他期间停止工作。待 SBR 对总氮 (TN) 去除效率高达 80% 以上时投加 TMP, 并控制其质量浓度分别为 0、1.0、2.0、4.0 mg/L 和 8.0 mg/L, 并定义各 SBR 为 R1、R2、R3、R4 和 R5。污泥停留时间通过好在好氧末期排泥方式控制在 12 d。进水 pH 通过添加 2.0 mol/L 的 NaOH 或 HCl 控制在 (7.0±0.2), 而在 SBR 运行过程不控制。整个实验运行阶段在室温为 (30±2) °C 的空调房内进行。

### 1.3 TMP 对模拟废水反硝化过程的影响

实验在 5 个相同的反应器内进行, 反应运行条件如 1.2 部分, 实验用水为人工合成废水, 主要成分

为乙酸钠 300 mg COD/L、 $NH_4Cl$  40 mg-N/L、微量元素储备液 5.0 mL。TMP 的质量浓度仍控制在 0、1.0、2.0、4.0 mg/L 和 8.0 mg/L。通过测定  $NH_4^+-N$  的质量浓度变化判断 TMP 对反硝化过程的影响。

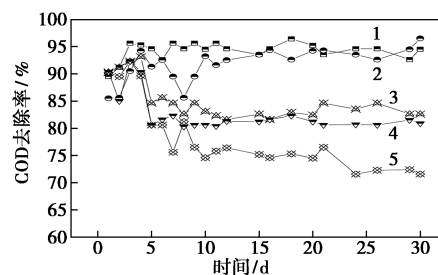
### 1.4 分析方法

TSS、COD、 $NH_4^+-N$ 、 $NO_2^- -N$ 、 $NO_3^- -N$  的测定采用国家标准方法<sup>[4]</sup>。TMP 测定采用高效液相色谱法, 流动相为甲醇和蒸馏水, 色谱柱为 Agilent Eclipse XDB-C18 (3.5  $\mu m \times 2.1 mm \times 150 mm$ )。硝酸盐还原酶 (NAR) 酶活性测定方法见文献<sup>[5]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 TMP 对 $NH_4^+-N$ 及 COD 去除的影响

TMP 对 SBR 去除 COD 的影响如图 1 所示。由图 1 中可以看出, 各反应器前 5 d 的 COD 去除效率均高达 90% 以上, 说明 TMP 短期暴露对 COD 的去除影响不明显 ( $p > 0.05$ )。对照组 R1 内, COD 的去除效率始终维持在 92.6%~95.3%, 低质量浓度 TMP 组别 R2 除了第 7~9 d 的 COD 去除下降至 85.9%~89.3%, 其余时间同样均高于 92.3%, 与 R1 相差不明显。而在 R3~R5 内, 随着 TMP 暴露量提高, 稳定时期 COD 去除效率呈现显著下降。在 R3 内, 稳定时期 COD 去除效率下降至 82.5%~84.6%, 说明当 TMP 的质量浓度为 2.0 mg/L 时已对序批式反应器除碳产生抑制作用。在 R5 内, TMP 质量浓度为 8.0 mg/L, COD 去除效率下降至 71.6%~76.5%, 显著低于对照组。实验结果表明, 低质量浓度 TMP 对 SBR 去除 COD 影响不明显, 而当 TMP 质量浓度超过 2.0 mg/L, COD 去除受到抑制, 且 TMP 质量浓度越高, COD 去除抑制越明显。TMP 具有一定的生态毒性, 刘锋等<sup>[6]</sup>研究表明, TMP 的质量浓度超过 10.0 mg/L 时, 土壤呼吸表现出很好的剂量依赖关系。TMP 的存在降低了土壤中微生物的代谢, 从而削弱呼吸作用。



1—R1; 2—R2; 3—R3; 4—R4; 5—R5

图 1 TMP 对 SBR 去除 COD 的影响

TMP 对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  去除效率的影响如图 2 所示。由图 2 中可以看出,前 5 d,各反应器内  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  去除效率均高达 92.5%,说明短期 TMP 暴露对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  去除影响不明显。然而,5 d 后,R1 和 R2 内  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  去除效率仍维持在 90% 以上,说明低质量浓度 TMP 对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  去除长期影响仍不明显。当 TMP 质量浓度超过 2.0 mg/L 时, $\text{NH}_4^+\text{-N}$  去除受到抑制,且存在 TMP 质量浓度越高, $\text{NH}_4^+\text{-N}$  去除抑制越显著。当 TMP 质量浓度为 8.0 mg/L 时,SBR 稳定时期  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  去除效率下降至 75.6%~76.2%,约为对照组 R1 的 94.6%~94.5%。陈炳伟等<sup>[3]</sup> 在好氧活性污泥中投加 TMP 同样发现高质量浓度 TMP 抑制了  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的去除,但  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  抑制具有可逆性,且经 25 d 后能恢复  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  去除。经 30 d 测试未发现高质量浓度 TMP 暴露下  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  去除的恢复,原因是本研究中所用接种物未经 TMP 的驯化。

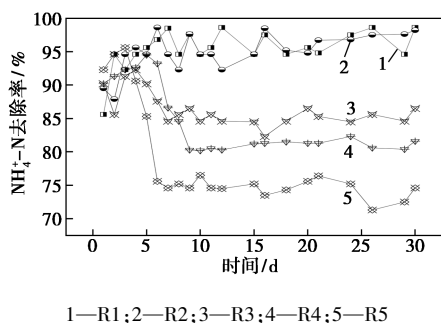


图 2 TMP 对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  去除效率的影响

## 2.2 TMP 对硝化过程的影响

TMP 对典型周期内  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  变化的影响如图 3 所示。由图 3 中可以看出,在好氧期,各反应器内  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  质量浓度迅速下降,主要是由于  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的氧化。低质量浓度 TMP 和对照组内, $\text{NH}_4^+\text{-N}$  质量浓度在好氧末期下降至 6.5 mg/L 和 6.3 mg/L,两者差异不明显 ( $p>0.05$ ),而高质量浓度 TMP 降低了  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的氧化,尤其当 TMP 质量浓度升高至 8.0 mg/L 时,好氧末期  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的质量浓度为 19.5 mg/L,较对照组提高约 13.0 mg/L,说明高质量浓度 TMP 对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的氧化具有严重抑制作用。缺氧期内各组别  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的质量浓度同样呈现下降趋势,在对照组内缺氧期  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  下降约为 2.2 mg/L,而随 TMP 质量浓度的升高,缺氧期  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  减少量呈现上升趋势,尤其当 TMP 暴露质量浓度为 8.0 mg/L 时, $\text{NH}_4^+\text{-N}$  减少量高达 6.7 mg/L。缺氧期  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  质量浓度下降一方面是微生物同化作用

消耗氮氮以合成自身蛋白质;另一方面,缺氧期内溶解氧质量浓度仍处于较高水平,高质量浓度 TMP 暴露组别内未完全氧化的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  在缺氧期继续被消耗,从而导致高质量浓度 TMP 暴露组别内缺氧期  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  质量浓度减少较大。

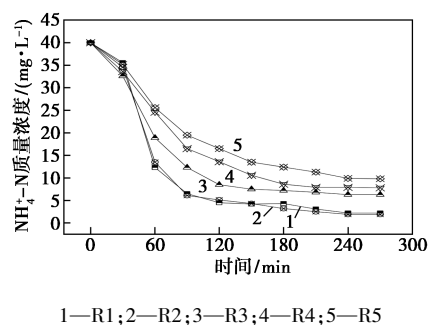


图 3 不同 TMP 影响下典型周期内  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的延程变化规律

典型周期内  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  质量浓度的变化情况如图 4 所示。由图 4 中可以看出, $\text{NO}_2^-\text{-N}$  的质量浓度在典型周期内呈现出先升高后下降的变化规律, $\text{NO}_2^-\text{-N}$  质量浓度升高主要是由于  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的氧化。与图 3 结果相似的是低质量浓度 TMP 对  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  变化影响不明显, $\text{NO}_2^-\text{-N}$  均存在较低积累且能迅速生物转化。在 R1 和 R2 内, $\text{NO}_2^-\text{-N}$  的最大质量浓度分别为 3.4 mg/L 和 3.5 mg/L,远低于高 TMP 暴露组别,说明在对照组和低质量浓度 TMP 组内氧化形成的  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  能被迅速氧化并利用,从而使反应过程不积累  $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 。当 TMP 质量浓度为 4.0、6.0 mg/L 和 8.0 mg/L 时, $\text{NO}_2^-\text{-N}$  的最大积累质量浓度分别高达 4.5、5.8 mg/L 和 6.5 mg/L,结果表明,TMP 的暴露质量浓度越大, $\text{NO}_2^-\text{-N}$  的积累量越大,从而对生物脱氮过程产生抑制作用越强烈。 $\text{NO}_2^-\text{-N}$  的氧化过程主要依赖微生物为 NOB,其对外界环境的变化较敏感,研究结果表明 TMP 存在对 NOB 的抑制

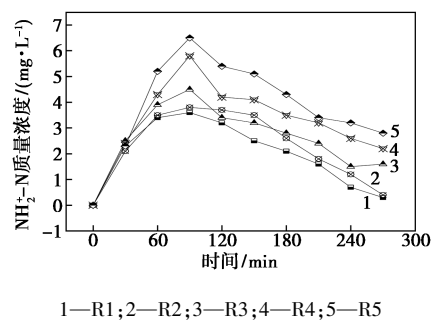
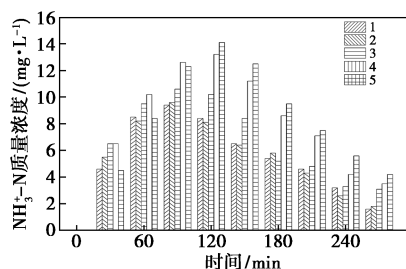


图 4 不同 TMP 影响下典型周期内  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  的延程变化规律

作用较大,从而导致硝化过程  $\text{NO}_2^-$ -N 的累积。高质量浓度  $\text{NO}_2^-$ -N 存在对生物活性具有不利影响,其能产生游离亚硝酸(FNA)透过生物膜进而干预合成代谢<sup>[7]</sup>。本研究中高质量浓度 TMP 导致硝化与反硝化体系内  $\text{NO}_2^-$ -N 的大量积累,从而对硝化和反硝化细菌生长、繁殖及代谢产生负面影响。

### 2.3 TMP 暴露对反硝化过程的影响

典型周期内  $\text{NO}_3^-$ -N 的变化情况如图 5 所示。由图 5 中可以看出,在好氧期  $\text{NO}_3^-$ -N 的质量浓度不断增加,而在缺氧期内高质量浓度 TMP 影响组别内  $\text{NO}_3^-$ -N 呈现出先增加后下降的趋势。在对照组和 R1 组内,好氧末期  $\text{NO}_3^-$ -N 的质量浓度分别为 9.4 mg/L 和 9.6 mg/L,相差不显著( $p>0.05$ ),说明低质量浓度 TMP 暴露对 NOB 的活性影响不明显。然而当 TMP 质量浓度升高至 2.0 mg/L 以上时, TMP 的存在对  $\text{NO}_3^-$ -N 的质量浓度积累具有明显的促进作用,尤其当 TMP 的质量浓度为 8.0 mg/L 时,好氧末期  $\text{NO}_3^-$ -N 的积累质量浓度高达 12.3 mg/L,并在随后的缺氧期前 30 min,  $\text{NO}_3^-$ -N 的质量浓度仍呈现上升趋势并达到 14.1 mg/L。高质量浓度 TMP 影响下缺氧前期游离溶解氧的质量浓度仍处于较高水平,  $\text{NO}_3^-$ -N 的质量浓度继续升高对后续反硝化过程产生较大负荷,对反硝化细菌的活性具有一定抑制。在低质量浓度 TMP 的缺氧期和高质量浓度 TMP 组的缺氧后期,  $\text{NO}_3^-$ -N 的质量浓度均大幅下降,此时,高质量浓度 TMP 暴露对  $\text{NO}_3^-$ -N 的去除抑制进一步显现,导致高质量浓度 TMP 组别内脱氮效率下降。

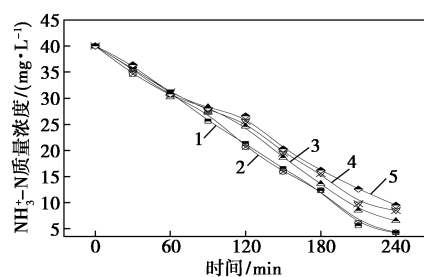


1—R1; 2—R2; 3—R3; 4—R4; 5—R5

图 5 TMP 对典型周期内  $\text{NO}_3^-$ -N 质量浓度变化的影响

在模拟废水中探究 TMP 对  $\text{NO}_3^-$ -N 去除的影响,结果见图 6。由图 6 中可以看出,初期碳源充足,反硝化动力足,各反应器内  $\text{NO}_3^-$ -N 的质量浓度迅速下降,且差别不明显。90 min 后,对照组和低质

量浓度 TMP 组别内,  $\text{NO}_3^-$ -N 的变化仍相似,说明低质量浓度 TMP 对模拟废水中  $\text{NO}_3^-$ -N 的反硝化去除影响不大,两反应器出水  $\text{NO}_3^-$ -N 质量浓度分别为 4.2 mg/L 和 4.3 mg/L。当 TMP 的暴露质量浓度为 2.0 mg/L 时,出水  $\text{NO}_3^-$ -N 的质量浓度升高至 6.5 mg/L,高于对照组,说明 2.0 mg/L TMP 已对反硝化过程产生一定抑制,且当 TMP 质量浓度为 8.0 mg/L 时,出水  $\text{NO}_3^-$ -N 的质量浓度继续下降至 9.5 mg/L,远高于对照组,说明高质量浓度 TMP 对反硝化抑制强烈。TMP 具有一定生态毒性,其大量存在对反硝化细菌的活性产生抑制,进而降低反硝化效果,且 TMP 的暴露质量浓度越大,反硝化抑制越明显<sup>[8-9]</sup>。

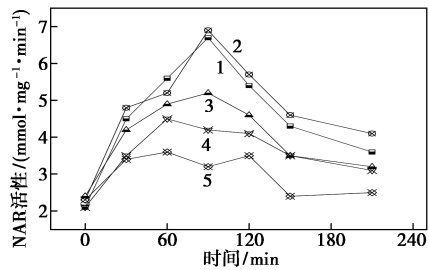


1—R1; 2—R2; 3—R3; 4—R4; 5—R5

图 6 TMP 对反硝化过程  $\text{NO}_3^-$ -N 质量浓度的影响

### 2.4 TMP 对反硝化关键酶活性的影响

反硝化过程涉及多种关键酶参与,其中 NAR 的活性与脱氮性能密切相关。 $\text{NO}_3^-$ -N 在 NAR 催化影响下转化为  $\text{NO}_2^-$ -N,然后再在其他关键酶催化下生物转化为  $\text{N}_2$ ,实现硝态氮向氮气的转化<sup>[10-11]</sup>。TMP 对反硝化过程关键酶 NAR 活性的影响见图 7。由图 7 中可以看出,实验初期各组别 NAR 活性大致相似,均在 2.1~2.4 mmol/(mg·min),在缺氧期,NAR 的活性逐渐提高且在 90 min 达到最大值。在缺氧模式,R1 和 R2 内 NAR 的活性分别为 6.7 mmol/(mg·min) 和 6.9 mmol/(mg·min),两者之间无明显差异,表明低质量浓度 TMP 暴露下 NAR 的活性无明显变化,这与之前的结果相一致。然而当 TMP 暴露质量浓度提高至 2.0 mg/L 以上时,NAR 的活性下降显著。在 R3 内,NAR 的最大活性仅为 5.2 mmol/(mg·min),而进一步提高 TMP 暴露质量浓度至 6.0 mg/L 和 8.0 mg/L,NAR 的最大活性继续下降至 4.2 mmol/(mg·min) 和 3.1 mmol/(mg·min),均远低于对照组。高质量浓度 TMP 对反硝化关键酶的抑制是其降低脱氮效果的关键因素。



1—R1;2—R2;3—R3;4—R4;5—R5

图7 TMP对反硝化过程关键酶NAR活性的影响

### 3 结论

(1)低质量TMP暴露对活性污泥除碳及脱氮影响不明显,而高于2.0 mg/LTMP降低了活性污泥对COD和 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 去除,且8.0 mg/L TMP时COD和 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 去除效率分别降低至71.6%~76.5%和75.6%~76.2%。

(2)高质量浓度TMP抑制了硝化与反硝化过程。高质量浓度TMP导致硝化系统中 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累,且当TMP质量浓度为8.0 mg/L时, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的最大积累质量浓度高达6.5 mg/L。高质量浓度TMP降低合成废水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的去除。

(3)TMP暴露能影响反硝化关键酶NAR活性,且TMP质量浓度超过2.0 mg/L时,NAR的活性受到抑制,进而降低反硝化效率。

### 参考文献

- [1] 邝江濛.两种典型PPCPs的臭氧氧化降解及机理研究[D].北京:清华大学,2013:23-50.
- [2] 杨腾飞,张小寒,黄钰淇,等.磺胺甲噁唑和甲氧苄啶对生物脱氮过程的影响规律[J].环境化学,2018,37(3):471-479.
- [3] 陈炳伟,张朝升,刘至能,等.甲氧苄啶对好氧活性污泥硝化作用的长期影响[J].中国给水排水,2020,36(9):1-6.
- [4] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].4版.北京:中国环境科学出版社,2002.
- [5] 王瑶,刘玉香,安华,等.金属离子对粪产碱杆菌C16的脱氮和亚硝酸盐积累的影响[J].微生物学通报,2014,41(11):2254-2263.
- [6] 刘锋,应光国,周启星,等.抗生素类药物对土壤微生物呼吸的影响[J].环境科学,2009,30(5):1280-1285.
- [7] 魏彩莹,张静,任露露,等.厌氧氨氧化活性抑制、恢复与强化及工艺应用研究进展[J].应用与环境生物学报,2018,24(3):671-680.
- [8] Frederic O, Yves P. Pharmaceuticals in hospital wastewater: Their ecotoxicity and contribution to the environmental hazard of the effluent[J].Chemosphere,2014,115:31-39.
- [9] Oros-Ruiz S, Zanella R, Prado B. Photocatalytic degradation of trimethoprim by metallic nanoparticles supported on  $\text{TiO}_2$ -P25[J]. Journal of Hazardous Materials,2013,263:28-35.
- [10] Liu N, Liao P, Zhang J, et al. Characteristics of denitrification genes and relevant enzyme activities in heavy-metal polluted soils remediated by biochar and compost[J].Science of the Total Environment, 2020,739:139987.
- [11] Chen Y, Su X, Wang Y, et al. Short-term responses of denitrification to chlorothalonil in riparian sediments: Process, mechanism and implication[J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 358: 1390-1398. ■
- [12] 邝江濛.两种典型PPCPs的臭氧氧化降解及机理研究[D].北京:清华大学,2013:23-50.
- [13] Wu S, Xie X, Cheng J, et al. Enhanced solubility and anticancer efficacy of curcumin by reduction-sensitive chondroitin sulfate A-ss-deoxycholic acid micelles[J]. Latin American Journal of Pharmacy, 2018,37(1):60-67.
- [14] 叶君,李文浩,熊捷.不同pH值下制备的CMC/Eu纳米络合粒子的粒径及其分布与粒子荧光性质的关系[J].华南理工大学学报(自然科学版),2014,42(6):73-78,120.
- [15] Wang J, Zhou J, Li Z, et al. Magnetic, luminescent Eu-doped Mg-Al layered double hydroxide and its intercalation for ibuprofen[J]. Chemistry-A European Journal, 2011,16(48):14404-14411.
- [16] 黄博文,吕荣宾,陈建钧,等.镁铝水滑石的合成及其在废水脱磷中的应用研究[J].高校化学工程学报,2018,32(3):683-689.
- [17] 柯国军,张琳,阳鹏飞,等.不同形貌镁铝水滑石的可控合成及其对氯离子的吸附性能[J].精细化工,2017,34(10):1107-1113.
- [18] 夏志勇,杜娜,刘建强,等.聚乙二醇和叶酸对层状双金属氢氧化物颗粒的表面修饰[J].高等学校化学学报,2013,34(3):596-600.
- [19] Tokudome Y, Morimoto T, Tarutani N, et al. Layered double hydroxide nanoclusters: Aqueous, concentrated, stable, and catalytically active colloids toward green chemistry[J]. ACS Nano, 2016, 10(5):5550-5559.
- [20] Morris S, Ananthapadmanabhan K P, Kasting G B. Anionic surfactant induced changes in skin permeability[J]. Journal of Pharmaceutical Sciences, 2019,108(11):3640-3648. ■

(上接第128页)