

## ◆生态环境与新材料结合◆

## 2,4,6-三氯苯酚废水处理过程对污泥性能和菌群结构的影响\*

李玉<sup>1</sup>, 徐永贵<sup>2</sup>, 董蓉<sup>1</sup>, 郭佳欣<sup>1</sup>, 金宝丹<sup>1</sup>, 赵建国<sup>1\*\*</sup>

(1. 郑州轻工业大学, 环境污染治理与生态修复河南省协同创新中心, 河南郑州 450001; 2. 河南省对外科技交流中心, 河南郑州 450001)

**摘要:**为考察2,4,6-三氯苯酚(2,4,6-TCP)废水处理过程对污泥性能和菌群结构的影响,利用序批式生物反应器(Sequencing Batch Reactor, SBR)处理2,4,6-TCP模拟废水,通过逐步提高进水2,4,6-TCP浓度(10-50 mg/L)的方式进行试验。结果表明,经10 mg/L 2,4,6-TCP驯化的活性污泥可有效降解进水化学需氧量(COD)和2,4,6-TCP,提高进水2,4,6-TCP浓度基本不影响污泥性能。当处理不同浓度的进水2,4,6-TCP的SBR处于稳定运行阶段末期时,污泥絮体中多糖和蛋白质含量随进水2,4,6-TCP浓度的提高而升高,脱氢酶(Dehydrogenase, DHA)、过氧化氢酶(Catalase, CAT)和超氧化物歧化酶(Superoxide Dismutase, SOD)的活性同样随进水2,4,6-TCP浓度的提高而升高。经2,4,6-TCP驯化的污泥中降解2,4,6-TCP的功能菌属显著富集,虽然不同浓度的进水2,4,6-TCP和不同的SBR运行阶段影响微生物多样性,但不同污泥中的微生物菌属具有一定的相似性。因此,通过逐步提高进水2,4,6-TCP浓度的方式驯化污泥可实现废水中2,4,6-TCP的有效去除。本研究的实施可为氯酚废水及其他难降解工业废水的处理提供科学指导。

**关键词:**2,4,6-TCP 废水 多糖 蛋白质 酶活性 菌群结构

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2021)04-0382-07

DOI: 10.13656/j.cnki.gxkx.20211109.001

## 0 引言

氯酚类化合物作为前体或中间体被广泛用于制药、防腐和杀菌等工业生产过程,在一些工业废水中氯酚类污染物含量高达几十甚至上百毫克,而在受这

些工业废水污染的市政水体中也检测出含量为微克至毫克级别的氯酚类污染物<sup>[1-3]</sup>。氯酚类化合物由于具有显著的生态毒性和可持续性,会通过食物链富集,被认定为优先控制的污染物。我国也将多种氯酚类化合物列为常规水质监测项目<sup>[3,4]</sup>。因此,如何有

收稿日期: 2021-05-17

\* 河南省科技攻关项目(212102310516)和国家自然科学基金项目(42007340)资助。

## 【作者简介】

李玉(1982-),男,博士,讲师,主要从事污水处理及生物质资源化利用研究。

## 【\*\*通信作者】

赵建国(1986-),男,博士,讲师,主要从事污水处理及污泥资源化利用研究, E-mail: zhaojianguo1226@126.com。

## 【引用本文】

李玉,徐永贵,董蓉,等. 2,4,6-三氯苯酚废水处理过程对污泥性能和菌群结构的影响[J]. 广西科学, 2021, 28(4): 382-388.

LI Y, XU Y G, DONG R, et al. Effects of 2,4,6-Trichlorophenol Wastewater Treatment on the Sludge Performance and Microbial Community Structure [J]. Guangxi Sciences, 2021, 28(4): 382-388.

效处理氯酚废水受到广泛关注。

由于氯酚废水中污染物成分和物理化学特性等较为复杂,物理和化学工艺通常难以充分去除该类污染物,且可能会产生毒性更强的转化产物<sup>[5]</sup>。活性污泥工艺成本较低,耐受污染物冲击,在废水处理过程中起重要作用。已有研究发现,经氯酚类污染物驯化后,活性污泥中降解氯酚的优势菌属富集;为避免氯酚类污染物对活性污泥的冲击,可通过投加易降解碳源的方式实现废水中氯酚的共代谢去除<sup>[3]</sup>。为抵抗氯酚类污染物对微生物的毒性作用,微生物代谢过程中分泌的胞外聚合物及蛋白质含量显著增加,而通过蛋白质可实现废水中污染物的降解<sup>[6]</sup>。微生物代谢过程中的脱氢酶(Dehydrogenase, DHA)活性可用于评估污染物的降解情况,过氧化氢酶(Catalase, CAT)和超氧化物歧化酶(Superoxide Dismutase, SOD)可清除自由基,避免其对微生物的损伤,故污泥性能可通过分析不同酶活性来评估<sup>[7]</sup>。但不同浓度的氯酚类污染物降解过程对污泥性能和菌群结构的影响仍需深入分析。基于此,本研究以甲醇为共代谢碳源,利用序批式生物反应器(Sequencing Batch Reactor, SBR)处理 2,4,6-三氯苯酚(2,4,6-TCP)模拟废水,通过逐步提高 2,4,6-TCP 浓度的方式驯化活性污泥,探讨 2,4,6-TCP 废水处理过程对污泥性能和菌群结构的影响,以为氯酚废水的处理提供科学指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

#### 1.1.1 主要试剂与仪器

试剂:磷酸二氢钾、磷酸氢二钾、重铬酸钾、硫酸汞、硫酸银、硫酸亚铁铵、氢氧化钠、碳酸氢钠、试亚铁灵、硫酸亚铁、萘酮、高锰酸钾、氯化三苯基四氮唑、盐酸、硫酸、过氧化氢、冰醋酸等均为国产分析纯。2,4,6-TCP 为 Tokyo 化工有限公司生产的分析纯。甲醇(纯度 $\geq 99.9\%$ )为国产色谱纯。

仪器:电子分析天平(FA1104N 型,上海双旭电子有限公司)、高速冷冻离心机(TGL-20bR 型,上海安亭科学仪器厂)、数显鼓风干燥箱(GZX-9030MBE 型,上海博迅实业有限公司)、紫外可见分光光度计(UV1102 型,上海天美科技有限公司)、超纯水机(ELGA 型,威立雅水处理技术上海有限公司)、高效液相色谱仪(LC-20ATVP 型,日本岛津公司)、恒温振荡器(SHZ-82 型,金坛市城西天竞实验仪器厂)、

便携式溶氧仪(YSI 型,美国 YSI 公司)、超声波处理器(FS-300 型,上海生析超声仪器有限公司)。

#### 1.1.2 接种污泥与模拟废水

实验所用污泥取自当地市政污水处理厂的好氧池污泥,用自来水清洗 3 次后接种到圆柱形 SBR, SBR 的有效体积为 5 L,直径和高度分别为 20 和 25 cm。调整 SBR 的初始混合液悬浮固体(Mixed Liquor Suspended Solids, MLSS)为  $(2\ 500 \pm 200)$  mg/L。模拟废水中的碳源由甲醇提供,进水化学需氧量(Chemical Oxygen Demand, COD)调整为 350 mg/L 左右。另外,补充废水中微生物代谢所需的氮、磷和微量元素,其具体成分及浓度详见表 1。进水 pH 值通过  $\text{NaHCO}_3$  和稀 HCl 调整为  $7.2 \pm 0.4$ 。

表 1 模拟废水中补充的氮、磷和微量元素

Table 1 Supplied nitrogen, phosphorus, and microelements in the simulated wastewater

成分 Compositions	浓度 Concentrations (mg/L)
$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	32
$\text{KH}_2\text{PO}_4$	13
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	23.9
$\text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	7.6
$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	7.0
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.047
$\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	0.06
$\text{ZnCl}_2$	0.09
$\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.20
$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.05

### 1.2 方法

#### 1.2.1 SBR 的运行

控制 SBR 的水力停留时间(Hydraulic Retention Time, HRT)为 8 h,包括进水 0.15 h,运行 7.00 h,静置 0.70 h 和排水 0.15 h。SBR 运行期间采用间歇曝气模式,曝气与不曝气时间比为 2 h : 2 h,曝气期间通过便携式溶氧仪控制废水中溶解氧(Dissolved oxygen, DO)为  $(1.5 \pm 0.5)$  mg/L,并通过搅拌将 DO 与污泥充分接触,不曝气期间停止搅拌。通过定时排泥的方式控制 MLSS 在  $(2\ 500 \pm 300)$  mg/L 左右。

当采用未补充 2,4,6-TCP 的模拟废水驯化活性污泥,且出水 COD 低于 50 mg/L 时,该模拟废水中补充浓度为 10 mg/L 的 2,4,6-TCP (1-56 d)。当

SBR 经过一段时间驯化,且运行结束后出水 COD 趋于稳定、水相和泥相中检测不到 2,4,6-TCP 时,依次将废水中的 2,4,6-TCP 浓度提高至 30 和 50 mg/L,其运行时间分别为 57-98 d 和 99-147 d,同时降低废水中甲醇浓度以维持进水 COD 浓度在 350 mg/L 左右。在整个 SBR 运行过程中,定期检测出水 COD、水相和泥相中 2,4,6-TCP 浓度的变化,以及分析污泥中多糖和蛋白质含量、不同酶活性和微生物多样性的变化,并与未投加 2,4,6-TCP 时的污泥絮体作对比。

### 1.2.2 测定项目

COD、MLSS 和 2,4,6-TCP 的测定:SBR 运行周期末,取上清液离心,采用酸性重铬酸钾法测定获得的上清液中 COD 含量,即为出水 COD;MLSS 通过重量法测定,具体测定方法详见《水与废水监测分析方法》(第四版)<sup>[8]</sup>;2,4,6-TCP 采用高效液相色谱仪测定,水相中 2,4,6-TCP 通过 0.45  $\mu\text{m}$  滤膜过滤后直接测定,泥相中 2,4,6-TCP 通过超声萃取的方法提取,而后通过 0.45  $\mu\text{m}$  滤膜过滤后测定。

多糖和蛋白质的测定:当 SBR 处理不同浓度 2,4,6-TCP 进水且处于稳定运行阶段末期时,取混合均匀的泥水混合液在 4 000 r/min 条件下离心 5 min,弃上清液,用磷酸缓冲液重悬至原体积后置于冰水浴中超声 10 min (功率 240 W,超声 4 s,停 4 s),在 12 000 r/min 和 4 $^{\circ}\text{C}$  条件下离心 10 min 后取上清液。上清液中的多糖含量采用蒽酮比色法测定,蛋白质含量采用 Lowry 法蛋白质试剂盒测定,具体操作步骤按照说明书执行。每个样品重复 3 次。

酶活性的测定:当 SBR 处理不同浓度 2,4,6-TCP 进水且处于稳定运行阶段末期时,取混合均匀的泥水混合液在 12 000 r/min 和 4 $^{\circ}\text{C}$  条件下离心 5 min,弃上清液,用磷酸缓冲液重复清洗 3 次后离心,所得污泥用于酶活性的测定。CAT 活性通过高锰酸钾滴定法测定<sup>[7]</sup>;DHA 活性通过加入氯化三苯基四氮唑的方法测定<sup>[7]</sup>;SOD 活性利用购自南京建成科技有限公司的试剂盒测定。每个样品重复 3 次。

### 1.2.3 微生物菌群结构分析

当处理不同浓度 2,4,6-TCP 进水的 SBR 处于不同运行条件时,利用 Ezup 柱式细菌基因组 DNA 抽提试剂盒提取污泥中基因组 DNA。细菌 16S RNA 扩增上游引物(357-F)和下游引物(518r)序列(5' $\rightarrow$ 3')为 357F: CCTACGGGAGGCAGCAG; 518r: ATTACCGCGGCTGCTGG。依据 BioLinker

公司提供的说明书进行 PCR 扩增,扩增产物通过 40% - 60% 的变性梯度凝胶电泳分离,电泳结束后对凝胶染色,拍照。采用 Quantity-One 软件对胶图进行分析,通过香农指数和戴斯系数分别评估不同污泥样品的微生物多样性和相似性。

## 2 结果与分析

### 2.1 出水 COD 和 2,4,6-TCP 浓度的变化

运行初期,10 mg/L 的进水 2,4,6-TCP 严重抑制污泥活性,出水 COD 急剧升高,在第 13 天时达到 194.7 mg/L(图 1a),前 20 d 的进水 2,4,6-TCP 去除较慢,水相和泥相中残留高浓度的 2,4,6-TCP(图 1b),这说明 2,4,6-TCP 的毒性作用显著抑制微生物活性,降解 2,4,6-TCP 的功能菌属未能充分富集。随着运行时间的延长,降解 2,4,6-TCP 的功能菌属富集,污泥活性逐渐恢复,出水 COD 降低,在 40-55 d 趋于稳定,平均为 45 mg/L。进水 2,4,6-TCP 也逐渐被降解去除,40 d 后水相和泥相中基本无 2,4,6-TCP 的残留。

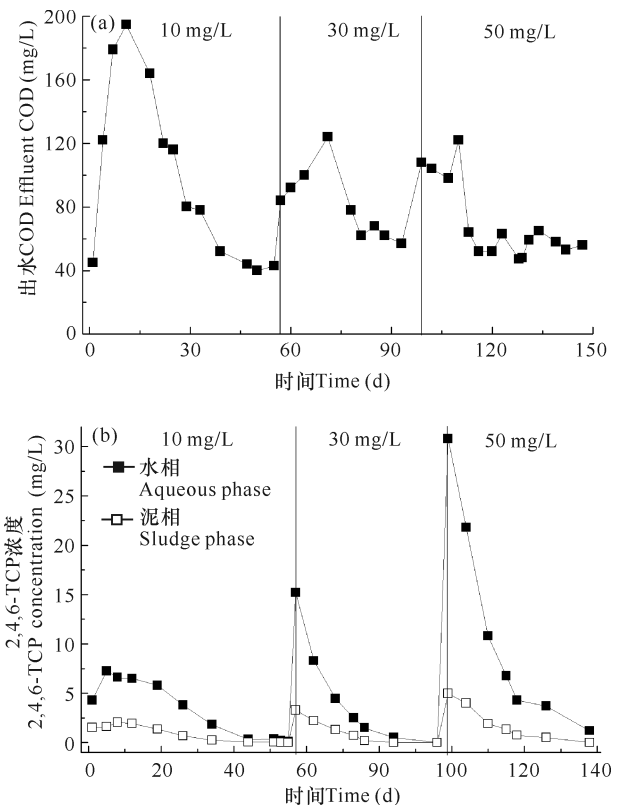


图1 出水 COD 及水相和泥相中 2,4,6-TCP 随运行时间的变化

Fig. 1 Variation of effluent COD and 2,4,6-TCP both in aqueous and sludge phases with operation time

此后,提高进水 2,4,6-TCP 浓度为 30 和 50

mg/L时,出水COD均在运行初期有短暂的升高(51-78 d和99-110 d),其浓度最高达到124 mg/L(71 d),而后快速降低并趋于稳定,在81-98 d和113-147 d的平均浓度分别为62和56 mg/L。相应地,进水2,4,6-TCP也被快速降解去除,水相和泥相中残留的2,4,6-TCP随运行时间的延长而显著降低。推断低浓度的进水2,4,6-TCP(10 mg/L)诱导降解2,4,6-TCP的功能菌属富集,活性污泥耐受污染物冲击的能力提高,故逐步提高进水2,4,6-TCP浓度对污泥活性影响较小。已有的研究也证实,低浓度4-氯苯酚驯化的活性污泥耐受高浓度氯酚类污染物冲击的能力更强<sup>[9]</sup>。因此,通过逐步提高进水2,4,6-TCP浓度的方式驯化污泥可有效去除废水中的2,4,6-TCP。

## 2.2 2,4,6-TCP对污泥中多糖和蛋白质的影响

当进水2,4,6-TCP浓度为0,10,30和50 mg/L时,污泥中多糖含量分别为(23.3 ± 1.82), (34.2 ± 1.34), (31.5 ± 3.15)和(42.9 ± 0.54) mg/g(以污泥干重计,图2);蛋白质含量分别为(47.2 ± 1.6), (67.8 ± 0.97), (100.4 ± 1.27)和(104.4 ± 2.43) mg/g(以污泥干重计,图2),即进水中2,4,6-TCP浓度的提高致使污泥中多糖和蛋白质含量增加,且蛋白质含量显著高于多糖,两者的比值为1.98-3.19。这是因为微生物代谢过程中会分泌大量的多糖物质包裹在污泥絮体表面,以抵抗2,4,6-TCP的毒性作用,蛋白质在降解2,4,6-TCP和维持微生物活性方面等起到非常重要的作用<sup>[6]</sup>。下一步可考虑采用蛋

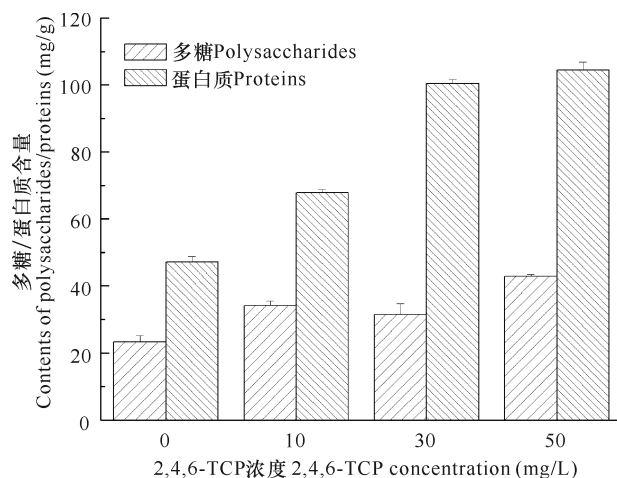


图2 不同进水2,4,6-TCP浓度下的污泥絮体中多糖和蛋白质含量

Fig. 2 Contents of polysaccharides and proteins in sludge flocs under different concentrations of influent 2,4,6-TCP

白质组学技术深入分析废水中不同浓度的2,4,6-TCP对污泥絮体中蛋白质结构和丰度的影响,以及不同类型蛋白质在降解2,4,6-TCP过程中的功能。

## 2.3 2,4,6-TCP对酶活性的影响

当进水2,4,6-TCP浓度为10,30和50 mg/L时,污泥中CAT的活性分别是未投加2,4,6-TCP时的1.58,1.87和2.50倍,DHA和SOD的活性则分别是未投加2,4,6-TCP时的1.32,1.71,1.82倍和1.16,1.37,1.75倍(图3),即进水2,4,6-TCP浓度的提高诱导这3种酶的活性显著提高。这是因为DHA活性的升高有助于降解去除2,4,6-TCP,而微生物在降解毒性有机物过程中会产生过量的氧自由基,CAT和SOD活性的升高则可清除自由基以达到维持微生物活性的作用<sup>[10]</sup>。已有的研究证实,CAT、SOD、过氧化物酶和还原型谷胱甘肽等共同构成了生物体的保护酶系统,可避免废水中有毒污染物引起生物体的蛋白质变性、脂质过氧化、DNA损伤和质膜系统破坏等现象的发生<sup>[10]</sup>。

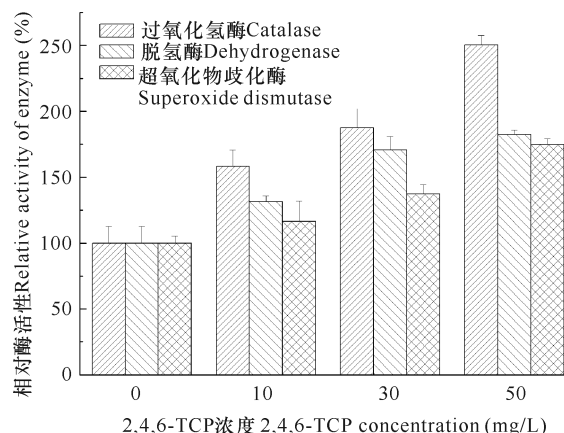


图3 不同进水2,4,6-TCP浓度对酶活性的影响

Fig. 3 Effects of different concentrations of influent 2,4,6-TCP on enzyme activities

## 2.4 2,4,6-TCP对污泥中菌群结构的影响

不同污泥中存在丰富的微生物菌属,但菌群结构和丰度显著受到进水2,4,6-TCP浓度的影响。当活性污泥经10 mg/L进水2,4,6-TCP驯化且处于稳定运行阶段末期时,部分菌属显著富集,即使进水2,4,6-TCP浓度由10 mg/L提高至30和50 mg/L,优势菌属的丰度无显著降低(图4),这也再次证实经低浓度进水2,4,6-TCP驯化的活性污泥中降解2,4,6-TCP的功能菌属显著富集,2,4,6-TCP浓度的逐渐升高对菌群结构影响较小,进水2,4,6-TCP及其他有机物被快速降解去除(图1)。

香农指数可表征不同污泥中的生物多样性,香



农指数越大,其微生物多样性越丰富<sup>[11]</sup>。条带1-5的香农指数分别为3.40,3.18,2.96,3.20和3.05。接种污泥取自市政污水处理厂,污染物成分复杂,故污泥中不同类型微生物最丰富(条带1),而模拟废水中污染物成分相对简单,微生物多样性出现明显下降的现象(条带2-4)。当进水2,4,6-TCP浓度由10 mg/L提高至30 mg/L且运行至第4天时(条带3),微生物多样性最低,推断此阶段耐受2,4,6-TCP毒性能力较差的菌属死亡,而其他类型的功能菌属还未充分富集所引起的。然而,当处理进水浓度为30 mg/L 2,4,6-TCP的SBR处于稳定运行阶段末期时(条带4),其微生物多样性比条带3有明显的升高。推断进水2,4,6-TCP诱使微生物分泌丰富的次级代谢产物,且2,4,6-TCP降解过程中产生多种代谢中间产物,此过程中降解次级代谢产物和氯酚类中间产



条带1:浓度10 mg/L,运行4 d;条带2:浓度10 mg/L,稳定运行阶段末期;条带3:浓度30 mg/L,运行4 d;条带4:浓度30 mg/L,稳定运行阶段末期;条带5:浓度50 mg/L,稳定运行阶段末期

Line 1:Concentration 10 mg/L,at the 4th d;line 2:Concentration 10 mg/L,at the end of stable operation;line 3:Concentration 30 mg/L,at the 4th d;line 4:Concentration 30 mg/L,at the end of stable operation;line 5:Concentration 50 mg/L,at the end of stable operation

图4 不同进水2,4,6-TCP浓度下污泥中的菌群结构变化

Fig. 4 Changes of microbial communities in sludge under different concentrations of influent 2,4,6-TCP

物的菌属富集,故微生物多样性增加。当进水2,4,6-TCP浓度提高至50 mg/L且处于稳定运行阶段末期时,微生物多样性又出现下降(条带5),由图4可以看出降解2,4,6-TCP的功能菌属富集,所占的比例增加,而其他类型的菌属丰度则因2,4,6-TCP的毒性作用降低直至消失。

戴斯相似性可表征不同污泥样品间的微生物相似性,其值越高,表明不同污泥样品间的微生物相似性越大,图4中5个不同污泥样品间的戴斯相似性分析结果见表2。虽然活性污泥中微生物菌群结构受不同浓度的进水2,4,6-TCP和不同运行阶段影响,但污泥中的菌群结构均有一定的相似性。当进水2,4,6-TCP浓度分别为10和30 mg/L且运行至第4天时,污泥样品间的戴斯相似性较低,为23.2%(条带1和3)。推断2,4,6-TCP的毒性作用导致SBR系统此时处于不稳定的运行状态,污泥中微生物菌属发生剧烈的演替,部分微生物菌属丰度降低或消失,而另一部分菌属则发生富集,结果造成两者间的微生物相似性较低。当进水2,4,6-TCP浓度分别为10和30 mg/L且处于稳定运行阶段末期时,污泥样品间的戴斯相似性最高,为56.6%(条带2和4),即低浓度进水2,4,6-TCP诱使降解2,4,6-TCP的优势菌属稳定存在,适当提高其浓度对菌属的演替影响较小。微生物相似性最低的两个污泥样品为条带1和5,为21.8%,这表明高浓度的进水2,4,6-TCP显著改变污泥中的菌群结构。在后续的研究中,可通过宏基因组学等技术鉴定降解2,4,6-TCP的功能菌属并进行富集,将富集的功能菌属用于实际氯酚废水的处理,以缩短驯化活性污泥所需的时间。

表2 不同进水2,4,6-TCP浓度下的污泥戴斯相似性

Table 2 Dice similarity of sludge under different concentrations of influent 2,4,6-TCP

条带编号 Line numbers	污泥样品戴斯相似性 Dice similarity of sludge sample (%)				
	1	2	3	4	5
1	100.0	44.9	23.2	27.8	21.8
2	44.9	100.0	47.9	56.6	40.6
3	23.2	47.9	100.0	42.3	40.3
4	27.8	56.6	42.3	100.0	51.4
5	21.8	40.6	40.3	51.4	100.0

### 3 结论

利用SBR工艺处理2,4,6-TCP浓度逐步提高

的模拟废水,探讨 2,4,6-TCP 废水处理过程对污泥性能和菌群结构的影响,主要得到以下结论:

经 10 mg/L 进水 2,4,6-TCP 驯化的活性污泥能够有效降解进水 COD 和 2,4,6-TCP。提高进水 2,4,6-TCP 浓度为 30 和 50 mg/L 时,出水 COD 和 2,4,6-TCP 仅在 SBR 运行初期有适当提高,而后被快速降解,污泥性能基本不受影响。当处理进水浓度为 10,30 和 50 mg/L 2,4,6-TCP 的 SBR 处于稳定运行阶段末期时,污泥絮体中的多糖和蛋白质含量基本随 2,4,6-TCP 浓度的增加而升高,蛋白质含量显著高于多糖。污泥中的酶活性(DHA、CAT 和 SOD)同样随 2,4,6-TCP 浓度的增加而升高。经 2,4,6-TCP 驯化的活性污泥中降解 2,4,6-TCP 的功能菌属显著富集,虽然不同浓度的进水 2,4,6-TCP 和不同的 SBR 运行阶段影响微生物多样性,但不同污泥中的微生物菌属均有一定的相似性。

#### 参考文献

- [1] GARBA Z N,ZHOU W M,LAWAN I,et al. An overview of chlorophenols as contaminants and their removal from wastewater by adsorption: A review [J]. *Journal of Environmental Management*,2019,241:59-75.
- [2] 赵建国,徐永贵,李刚强,等. 五氯苯酚对污泥急性毒性和菌群结构的影响[J]. *轻工学报*,2021,36(1):58-66.
- [3] ZHAO J G,LI Y H,CHEN X R,et al. Effects of carbon sources on sludge performance and microbial community for 4-chlorophenol wastewater treatment in sequencing batch reactors [J]. *Bioresource Technology*,2018,255:22-28.
- [4] 夏青,陈艳卿,刘宪兵. 水质基准与水质标准[M]. 北京:中国标准出版社,2004.
- [5] BIAN W J,SONG X H,LIU D Q,et al. The intermediate products in the degradation of 4-chlorophenol by pulsed high voltage discharge in water [J]. *Journal of Hazardous Materials*,2011,192(3):1330-1339.
- [6] ZHAO J G,CHEN X R,WANG L,et al. Effects of elevated 4-chlorophenol loads on components of polysaccharides and proteins and toxicity in an activated sludge process [J]. *Chemical Engineering Journal*,2017,330:236-244.
- [7] ZHAO J G,LI Y H,LI Y,et al. Effects of 4-chlorophenol toxicity on sludge performance and microbial community in sequencing batch reactors [J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*,2019,54(6):498-505.
- [8] 国家环境保护总局. 水与废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京:中国环境科学出版社,2002.
- [9] MONSALVO V M,MOHEDANO A F,CASAS J A,et al. Cometabolic biodegradation of 4-chlorophenol by sequencing batch reactors at different temperatures [J]. *Bioresource Technology*,2009,100(20):4572-4578.
- [10] 杜坚坚. 模拟废水中黄孢原毛平革菌氧化应激产生的机制研究[D]. 长沙:湖南大学,2014.
- [11] ZHAO J G,CHEN X R,LIN F K,et al. Mechanism of toxicity formation and spatial distribution in activated sludge treating effluent containing bisphenol A (BPA) [J]. *Chemical Engineering Journal*,2014,250:91-98.

## Effects of 2,4,6-Trichlorophenol Wastewater Treatment on the Sludge Performance and Microbial Community Structure

LI Yu<sup>1</sup>, XU Yonggui<sup>2</sup>, DONG Rong<sup>1</sup>, GUO Jiaxin<sup>1</sup>, JIN Baodan<sup>1</sup>, ZHAO Jianguo<sup>1</sup>

(1. He'nan Collaborative Innovation Center of Environmental Pollution Control and Ecological Restoration, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou, He'nan, 450001, China; 2. He'nan Science and Technology Exchange Center with Foreign Countries, Zhengzhou, He'nan, 450001, China)

**Abstract:** In order to investigate the effect of 2,4,6-trichlorophenol (2,4,6-TCP) wastewater treatment process on sludge performance and bacterial community structure, a sequencing batch reactor (SBR) was used to treat 2,4,6-TCP simulated wastewater. The experiment was carried out by gradually increasing the

influent 2,4,6-TCP concentration (10–50 mg/L). The results showed that the activated sludge acclimated by 10 mg/L 2,4,6-TCP could effectively degrade the influent chemical oxygen demand (COD) and 2,4,6-TCP, and increasing the concentration of the influent 2,4,6-TCP basically did not affect the sludge performance. After the SBR operated at the end of stable operational stages by treating different concentrations of influent 2,4,6-TCP, the contents of polysaccharides and proteins in sludge flocs were increased with the increase of influent 2,4,6-TCP, and the activities of dehydrogenase (DHA), catalase (CAT) and superoxide dismutase (SOD) were also increased with the increase of influent 2,4,6-TCP. The functional genera for 2,4,6-TCP degradation were significantly enriched after being acclimated by 2,4,6-TCP. Although the microbial diversity was affected by the different concentrations of influent 2,4,6-TCP and different stages of SBR operation, the microbial genera in different sludge had a certain similarity. Therefore, the effective removal of 2,4,6-TCP from wastewater could be achieved by acclimated sludge through gradually increasing the influent 2,4,6-TCP concentration. The implementation of this study could provide the scientific guidance for the treatment of chlorophenols wastewater and other refractory industrial wastewater.

**Key words:** 2,4,6-TCP wastewater, polysaccharides, proteins, enzymatic activity, microbial community

责任编辑: 陆 雁



微信公众号投稿更便捷

联系电话: 0771-2503923

邮箱: gxxk@gxas.cn

投稿系统网址: <http://gxxk.ijournal.cn/gxxk/ch>