

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.17.016

基于生物共代谢的好氧活性污泥降解苯酚废水研究

陈浩然, 吕利丰, 王宗平, 苗 蕾

(华中科技大学 环境科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 基于好氧活性污泥系统,选用乙酸钠作为共代谢基质,探究生物共代谢对苯酚废水的降解效果。当苯酚浓度较高(1 000 mg/L)时,普通好氧活性污泥对其去除效果较差(30%以下)。乙酸钠能够提高系统对苯酚的去除效果,且随溶解氧(DO)增加而增强;当DO达到(5.0±0.7) mg/L时,苯酚的去除率高达84.17%左右。高通量测序表明,苯酚会降低微生物多样性,对微生物种群结构产生显著影响,且不能通过投加乙酸钠而恢复。在处理苯酚的污泥样本中,*Azotobacter*与*Bdellovibrio*为优势菌属,相对丰度分别达到12.97%和9.08%;而在共代谢样本中,norank_f__*Caldilineaceae*、*Allorhizobium-Neorhizobium-Pararhizobium-Rhizobium*、*Propioniciclava*与*Ottowia*则成为优势菌属。生物共代谢是一种高效低成本的处理技术,为苯酚废水的降解提供了新思路。

关键词: 苯酚废水; 好氧活性污泥; 生物共代谢; 乙酸钠; 微生物多样性

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)17-0099-07

Aerobic Activated Sludge for Degradation of Phenol Wastewater Based on Biological Co-metabolism

CHEN Hao-ran, LÜ Li-feng, WANG Zong-ping, MIAO Lei

(School of Environmental Science & Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Based on aerobic activated sludge system, sodium acetate was selected as co-metabolic substrate to investigate the biological co-metabolism performance of phenol wastewater. When the phenol concentration was high (1 000 mg/L), common aerobic activated sludge had a poor removal efficiency of phenol (less than 30%). Sodium acetate improved the removal efficiency of phenol, and the removal efficiency increased with the increase of dissolved oxygen (DO). When DO reached (5.0±0.7) mg/L, the highest removal rate of phenol (84.17%) was obtained. High-throughput sequencing analysis showed that phenol reduced the microbial diversity and significantly affected the microbial community composition. However, the microbial diversity could not be improved by adding sodium acetate. In sludge samples from the phenol treatment process without adding sodium acetate, *Azotobacter* and *Bdellovibrio* were the dominant bacterial genera with relative abundances of 12.97% and 9.08%, respectively. While in the co-metabolic sludge samples, norank_f__*Caldilineaceae*, *Allorhizobium-Neorhizobium-Pararhizobium-Rhizobium*, *Propioniciclava* and *Ottowia* were the dominant bacterial genera. Therefore, this paper develops a high efficiency and low cost phenol treatment process, which can provide a new idea for the degradation of phenol wastewater.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFA0905504)

Key words: phenol wastewater; aerobic activated sludge; co-metabolism; sodium acetate; microbial diversity

目前针对苯酚废水的处理,通常可分为物理化学法和生物法^[1]。尽管前者对苯酚的去除效果较好^[2],但成本高昂,而生物法则能低成本地降解苯酚。陈春等^[3]筛选并培养出苯酚降解菌,可以在36 h实现对焦化废水95%以上的苯酚去除率。邓冬梅等^[4]分离得到了一株苯酚降解菌B2,当pH为6.5~8.0时,该菌株能耐受苯酚的最大浓度为2 500 mg/L。然而普通的生物法处理废水时间长、效率低,如何提高苯酚生物降解效率是目前研究的重点。

生物共代谢技术能够通过投加针对性基质,使微生物在利用基质的同时促进对难降解有机物的去除,具有专一高效性等优点,目前已逐渐应用于污水处理中^[5]。Shen等^[6]利用乙酸钠共代谢提高了生物燃料电池的产能效果,并且将系统内苯酚降解率提高到78.8%。生物共代谢能够有效提高难降解有机物的去除率,但也会受基质类型、温度、溶解氧(DO)等反应条件的影响。李岩等^[7]以汽油为底物降解三氯乙烯,发现体系水相中DO不断被微生物消耗,3 d内DO从8.12 mg/L降到3.28 mg/L,限制了三氯乙烯的好氧降解。Li等^[8]采用酵母作为基质和纸板共消化,35℃时系统产酸和产甲烷效率最高,分别为76.2%和46.4%。因此,选择合适的运行条件对生物共代谢的有效应用至关重要。

目前生物共代谢已经在芳香族化合物、含氯化合物、抗生素等难降解有机污染物的处理方面得到了广泛研究^[9],然而大多数采用的是单一菌株体系,具有菌种单一、抵抗与适应能力较差、对环境要求高等问题^[10]。因此笔者采用生物共代谢技术,基于普通的好氧活性污泥系统,通过添加简单碳源乙酸钠,以实现强化苯酚废水降解的效果。同时通过改变对反应影响较大的DO浓度,探究不同DO条件下苯酚的降解效果,并结合污泥胞外聚合物和微生物多样性分析,明确好氧共代谢系统的适宜曝气浓度及微生物种群结构变化,旨在研发一种高效低成本的工艺,为苯酚废水的降解提供新思路。

1 材料和方法

1.1 试验污泥与用水

试验接种污泥取自武汉市汤逊湖污水处理厂

A²/O工艺的好氧池,经过浓缩驯化后,接种污泥浓度为(5 800±200) mg/L。试验用水采用人工配制的模拟废水,以苯酚为溶质、纯水为溶剂配制50 g/L高浓度苯酚贮存液,于4℃条件下避光密闭保存。反应器进水时,按所需含酚废水浓度将贮存液与自来水混合,现用现配。定期向SBR系统投加适量氮源、磷源、矿物元素与微量元素等,使反应器pH始终保持在7.5±0.8范围内。

1.2 试验装置和方案

1.2.1 试验装置

采用小型SBR为反应装置,外部设有水浴恒温槽。电动搅拌器转速为40 r/min左右。反应器内配备pH与DO探头,水浴恒温槽内配备温控加热装置。

1.2.2 试验方案

将污泥置于10 L的SBR母反应器中驯化启动20 d,根据试验效果逐渐调整反应器进水苯酚浓度至(1 000±20) mg/L,并使系统对苯酚降解达到稳定效果。在驯化阶段,SRT控制为105 d,污泥负荷(以COD计)调整为0.02~0.45 kg/(kgMLSS·d)。在此基础上,将驯化完成的污泥接种到两个5 L的SBR反应器中,污泥浓度均控制在(6 100±200) mg/L,SRT与驯化阶段保持一致。其中一个SBR进水只含有苯酚,命名为苯酚组;另一个SBR进水中添加苯酚和乙酸钠,命名为乙酸钠组,以探究好氧活性污泥共代谢对苯酚的降解效果,并通过改变DO,研究最适宜的曝气条件。SBR一个反应周期设置为12 h,包括进水(10 min)、反应(8 h,曝气搅拌)、沉淀(40 min)、出水(10 min)、静置(3 h)。排水比控制为30%(HRT=3.3 d)。试验的反应条件见表1。

表1 试验操作参数

Tab.1 Operating parameters of experiment

项 目	进水苯酚浓度/(mg·L ⁻¹)	共代谢基质浓度/(mg·L ⁻¹)	温度/℃	DO/(mg·L ⁻¹)	反应周期/h
苯酚组	1 000±20	0	26	1.5±0.3	12
				3.0±0.5	
				5.0±0.7	
乙酸钠组	1 000±20	100±5	26	1.5±0.3	12
				3.0±0.5	
				5.0±0.7	

1.3 分析方法

苯酚采用4-氨基安替比林法检测^[11],COD采用哈希试剂检测。胞外聚合物的提取采用“甲醛+NaOH”方法。多糖采用蒽酮比色法测定^[12],蛋白质采用修正的福林-酚法测定。对于系统内不同试验条件下的微生物种群结构情况,采用MiSeq高通量测序方法进行分析。

2 结果与讨论

2.1 好氧活性污泥处理苯酚废水

在驯化阶段,将DO控制在1.5 mg/L,根据试验效果调整反应器进水苯酚浓度至(1 000±20) mg/L,使污泥逐渐适应苯酚水质。反应器启动效果如图1所示。

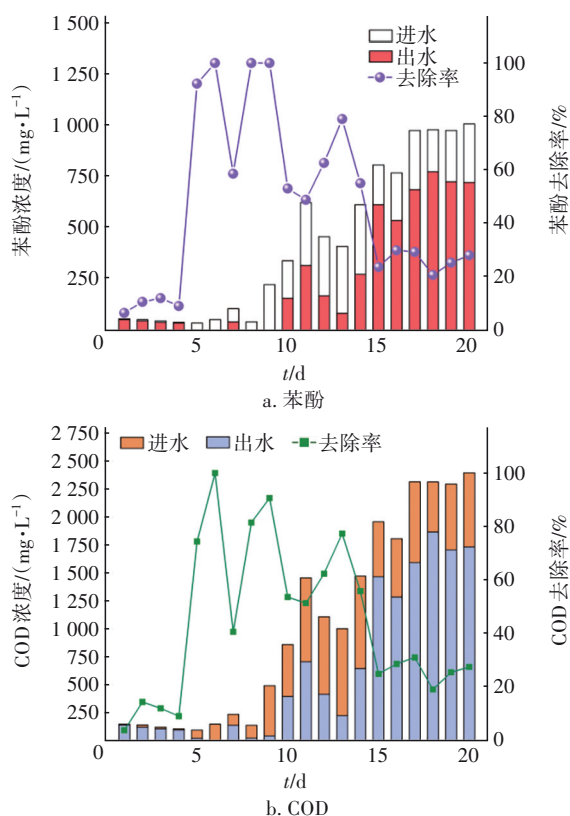


图1 好氧活性污泥处理苯酚废水的驯化启动效果

Fig.1 Performance of phenol removal by aerobic activated sludge during start-up period

经过20 d的驯化启动,污泥浓度逐渐从5 800 mg/L增至6 900 mg/L左右,好氧活性污泥对苯酚已具备一定的降解能力。当苯酚浓度低于600 mg/L时,经过4 d短暂适应水质后,苯酚去除率基本维持在50%以上;然而当系统内苯酚浓度逐渐提高到(1 000±50) mg/L时,苯酚与COD的去除率均下降至

30%左右。这表明当苯酚浓度较低时,对微生物抑制作用较小,普通的活性污泥对其有较好的去除效果;但随着苯酚浓度提高,系统受到较强的负荷冲击,其降解能力严重受限^[13]。

从启动阶段可知,在较低DO条件下,普通活性污泥可以较好地去除浓度低于600 mg/L的苯酚,但对浓度为1 000 mg/L的苯酚去除效果有限(仅为30%左右)。为了进一步提高系统对高浓度苯酚的去除效果,将苯酚组进水苯酚浓度依然维持在1 000 mg/L左右,污泥负荷为(0.39±0.02) kg/(kgMLSS·d),分别将DO控制在(1.5±0.3)、(3.0±0.5)和(5.0±0.7) mg/L,探究不同浓度DO对苯酚去除效果的影响,结果见图2。

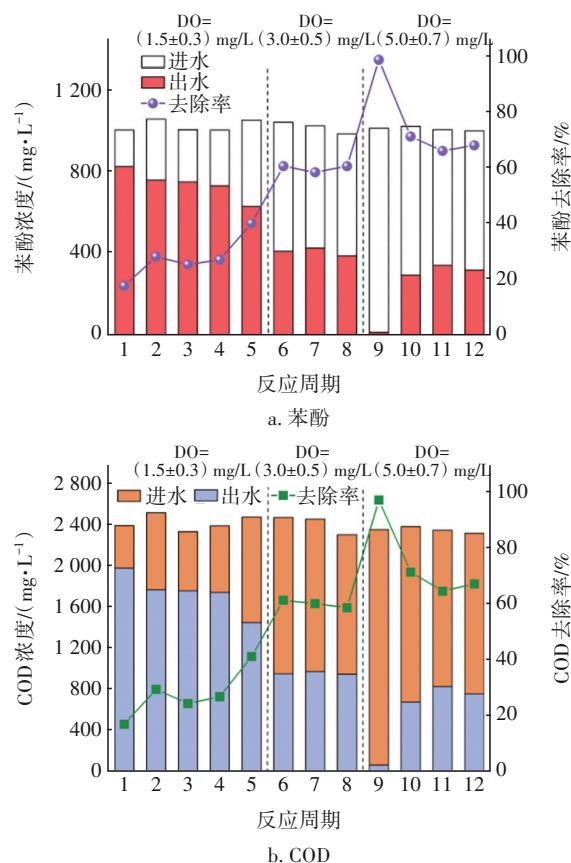


图2 DO对普通活性污泥降解苯酚和COD的影响

Fig.2 Effect of DO on the degradation of phenol and COD treated by ordinary activated sludge process

由图2可知,当DO较低[(1.5±0.3) mg/L]时,好氧活性污泥系统可以去除25.38%的苯酚。随着DO提高到5.0 mg/L,苯酚去除率也逐渐升高至67.07%以上。这表明DO的增加使得微生物充分利用氧气进行代谢活动,从而使其活性得到提高,

对苯酚的降解效果也进一步得到提升。

2.2 乙酸钠共代谢处理高浓度苯酚废水

DO是好氧降解苯酚的重要影响因素。尽管增大DO能够提高苯酚的去除率,但当DO达到一定浓度(从3.0 mg/L增至5.0 mg/L)时,苯酚去除率的提升效果不明显,且曝气量过大会导致较高的运行费用。因此,选用乙酸钠作为共代谢基质,探究生物共代谢对苯酚的好氧降解效果。图3为不同DO下共代谢降解苯酚和COD的情况。

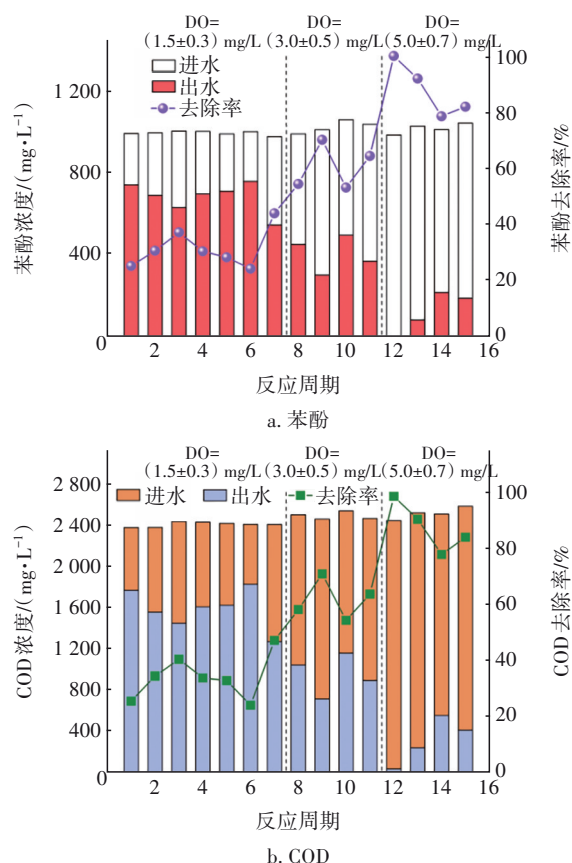


图3 不同DO下共代谢降解苯酚和COD的情况

Fig.3 Effect of phenol and COD removal by co-metabolism process under different DO

由图3可知,在进水添加100 mg/L乙酸钠后,乙酸钠组的污泥负荷升高至 (0.40 ± 0.02) kg/(kgMLSS·d),在不同DO条件下,苯酚的去除均有不同程度的提高。当DO较低 $[(1.5\pm0.3)$ 和 (3.0 ± 0.5) mg/L]时,苯酚去除率仅有小幅度提高(分别为31.45%和60.56%),这表明乙酸钠作为共代谢基质对苯酚的去除有一定促进作用,但由于DO较低,系统内微生物的活性受到限制,因此其促进效果并不明显。当DO增至 (5.0 ± 0.7) mg/L时,苯酚去除率

达到84.17%左右,相较于同条件下普通活性污泥有了较大程度的提高。由此可知,采用乙酸钠作为共代谢基质,能够有效提高对苯酚的去除效果,且当DO较高时,微生物能够充分利用氧气增强自身代谢反应,同时促进对苯酚的降解,因此去除效果更好。

2.3 不同系统中污泥胞外聚合物特性分析

胞外聚合物通常能够反映污泥的性能(如沉降性能、缓冲有害物质性能等),对最终处理效果有着重要影响^[14]。分别选取驯化前未加苯酚的普通活性污泥(对照组)、投加苯酚处理效果稳定后的普通活性污泥(DO=5.0 mg/L,苯酚组)以及共代谢系统处理效果稳定后的活性污泥(DO=5.0 mg/L,乙酸钠组),对各组污泥胞外聚合物的组分和含量进行分析。

对照组胞外聚合物(以MLSS为基础)中蛋白质和多糖的含量分别为81.9和15.1 mg/g。苯酚组胞外聚合物浓度明显提升,其中蛋白质浓度升至148.6 mg/g,多糖浓度也提高到45.1 mg/g。Chen等研究表明,苯酚对微生物有较强的毒性^[15],在这种抑制作用下,微生物活性受到较大影响,从而导致苯酚去除率降低;同时微生物也在苯酚的刺激下,分泌更多的蛋白质和多糖以增强缓冲作用,应对不利环境^[16-17]。因此,相较于对照组,苯酚组胞外聚合物中的蛋白质和多糖含量均大幅增加。在乙酸钠组中,蛋白质与多糖相较于苯酚组均有所降低(分别为87.8和8.2 mg/g)。这是由于在苯酚的抑制作用下,微生物分泌更多胞外聚合物,而乙酸钠的投加促进了苯酚降解,从而缓解了对微生物的抑制,因此微生物的胞外聚合物含量下降。不同组的胞外聚合物中,多糖的变化幅度始终高于蛋白质,这可能是由于多糖的产生是好氧活性污泥菌体细胞抵御苯酚毒性的主要途径^[18],因此受外界环境影响较大。

2.4 不同处理系统内微生物种群结构变化

微生物种群结构变化从微观上影响着好氧活性污泥系统对苯酚的降解效果,因此同样选取对照组、苯酚组以及乙酸钠组,对其微生物多样性及种群结构进行分析。

2.4.1 微生物多样性分析

3组污泥样本经高通量测序,共检测到有效序列127 392条,操作分类单元(OTU)1 455个。各样

品的微生物多样性指数如表2所示。可知,对照组的Shannon指数高于苯酚组,这表明苯酚作为有毒物质可使部分微生物活性降低。投加乙酸钠后Shannon指数继续下降,说明微生物多样性并不受共代谢基质影响,即乙酸钠可以强化苯酚的去除效果,但并不能恢复微生物多样性。同时,3组样本的Coverage指数均在0.99以上,表明测序结果能够反映样本的真实性。

表2 不同系统内污泥中微生物多样性指数
Tab.2 Microbial diversity indices of sludge in different samples

项 目	Shannon	Simpson	Chao	Coverage
对照组	5.246 7	0.014 1	1 224.791 3	0.995 8
苯酚组	4.961 8	0.030 7	1 288.102 0	0.995 2
乙酸钠组	4.120 1	0.041 1	972.095 2	0.994 9

2.4.2 微生物种群结构变化

3组样本中共检出34个菌门。图4为不同系统内污泥中微生物在门水平上的结构。

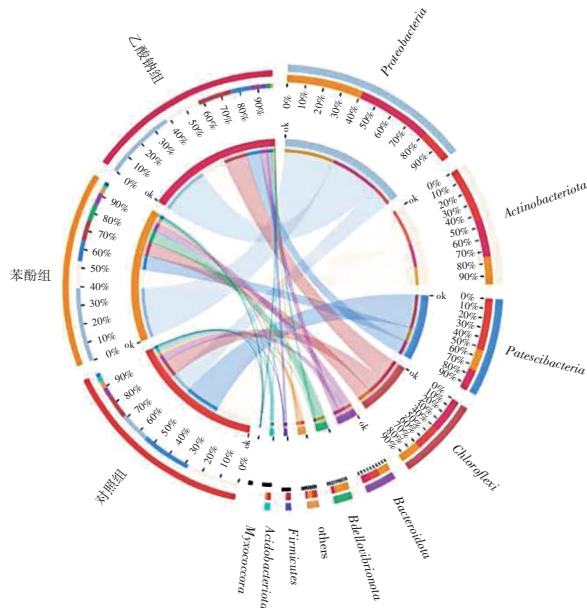


图4 不同系统内污泥中微生物在门水平上的结构

Fig.4 Microbial community structure in different samples at phylum level

从图4可以看出,在3组样本中Proteobacteria、Patescibacteria、Actinobacteriota与Chloroflexi始终为优势菌门。对照组Actinobacteriota与Patescibacteria丰度最高,可达到28.78%和27.50%,Proteobacteria、Chloroflexi和Bacteroidota的丰度分别达到16.56%、13.15%和5.42%。投加苯酚后,菌门丰度发生显

著变化,Proteobacteria和Bdellovibrionota的丰度显著增加,分别升至39.95%和9.29%,而Actinobacteriota与Patescibacteria的丰度大幅下降到14.66%和11.47%;此外,Chloroflexi(11.27%)与Bacteroidota(6.58%)的相对丰度仅有小幅度变化。由此可见,投加苯酚后活性污泥内的微生物种群结构发生了显著变化,Proteobacteria和Bdellovibrionota中可能含有更多耐苯酚以及降解苯酚的菌种。投加乙酸钠后,乙酸钠组中优势菌门依然为Proteobacteria(38.86%),Chloroflexi与Actinobacteriota的丰度也相应升高到18.39%和19.89%,但Bdellovibrionota菌门的丰度却下降至1.77%。由此可知,投加乙酸钠作为共代谢基质会对活性污泥系统的微生物种群结构产生影响,乙酸钠可能促进了苯酚降解并缓解苯酚对微生物的毒害作用,从而促进了其他微生物的增殖。

为进一步探索不同系统中的微生物种群结构变化,从属水平对3组样本进行了分析(见图5)。对照组中的主要优势菌属为norank_f_norank_o_Saccharimonadales(13.64%)、norank_f_norank_o_PeM15(9.53%)、norank_f_LWQ8(9.40%)、Propionicicella(3.04%)等。当投加苯酚后,主要优势菌属结构发生了较大变化,其中Azotobacter和Bdellovibrio的相对丰度分别达到12.97%和9.08%。有研究表明^[19],Azotobacter在好氧条件下产生的特定胞内酶可参与降解苯酚的过程中。Bdellovibrio则被证实在受到外界环境刺激后,通过自身应激性(分泌胞外聚合物、菌体交联聚集等)反应,可以较快适应恶劣环境,是一类适应性较强的好氧菌属^[20]。因此,Azotobacter和Bdellovibrio这两类菌属可能具有耐苯酚毒性或降解苯酚的能力。

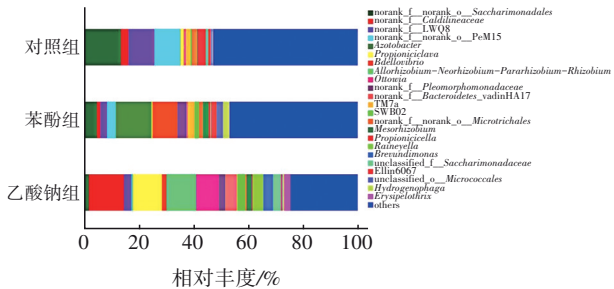


图5 不同系统内污泥中微生物在属水平上的结构

Fig.5 Microbial community structure in different samples at genus level

投加乙酸钠作为共代谢基质后,微生物菌属结构又发生了显著变化,此时的主要优势菌属为 *norank_f_Caldilineaceae* (12.81%)、*Allorhizobium-Neorhizobium-Pararhizobium-Rhizobium* (10.64%)、*Propioniciclava* (10.72%) 和 *Ottowia* (8.34%), 表明乙酸钠的投加在一定程度上缓解了苯酚对微生物的毒性抑制,促进了其他菌属的增殖。有研究报道^[21],在处理硫氰酸酯类与酚类物质废水的活性污泥中发现了 *Ottowia*,其可能参与酚类物质的降解。Jiang等^[22]研究发现 *norank_f_Caldilineaceae* 与总有机碳(TOC)呈正相关关系,加入乙酸钠使TOC增加,从而促进了该菌种的增殖。此外,*Propioniciclava* 能发酵各种碳水化合物,因此,该菌属可能通过发酵降解苯酚和乙酸钠而大量增殖^[23]。

3 结论

基于好氧活性污泥系统,采用生物共代谢技术实现了对苯酚(1 000 mg/L)的有效去除。普通好氧活性污泥对低浓度苯酚具有较好的去除效果,但随着苯酚浓度增大,其去除效果会变差。采用乙酸钠作为共代谢基质能够有效提高对高浓度苯酚的去除效果,去除率最高可达84.17%左右,且去除效果随DO增大而增强。苯酚废水会降低生物多样性,对微生物种群结构产生显著影响,且不能通过投加乙酸钠而恢复。

参考文献:

- [1] 张牧原,彭自然,刘可玉,等. 高浓度苯酚降解产电菌ZY07的筛选及其降解产电特性[J]. 环境工程学报, 2021, 15(10): 3324-3333.
ZHANG Muyuan, PENG Ziran, LIU Keyu, *et al.* Screening of high-concentration phenol-degrading electrogenic strain ZY07 and its biodegradation and electricity-generating characteristics [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(10): 3324-3333(in Chinese).
- [2] 王丽叶,陶雨,班春兰,等. Mn-Mg-Ce/AC催化臭氧氧化降解水中苯酚的研究[J]. 现代化工, 2022, 42(11): 201-206.
WANG Liye, TAO Yu, BAN Chunlan, *et al.* Degradation of phenol in aqueous solution by Mn-Mg-Ce/AC catalytic ozonation[J]. Modern Chemical Industry, 2022, 42(11): 201-206(in Chinese).
- [3] 陈春,李文英,吴静文,等. 焦化废水中苯酚降解菌筛选及其降解性能[J]. 环境科学, 2012, 33(5): 1652-1656.
CHEN Chun, LI Wenying, WU Jingwen, *et al.* Screening and characterization of phenol degrading bacteria for the coking wastewater treatment [J]. Environment Science, 2012, 33(5): 1652-1656 (in Chinese).
- [4] 邓冬梅,何勃,孙宇飞,等. 焦化废水中苯酚降解菌筛选及其降解特性[J]. 广西科技大学学报, 2016, 27(4): 93-98.
DENG Dongmei, HE Qing, SUN Yufei, *et al.* Screening and characterization of phenol degrading bacteria from the coking wastewater [J]. Journal of Guangxi University of Science and Technology, 2016, 27(4): 93-98(in Chinese).
- [5] LI Y, LIU L, WANG Q, *et al.* Enhanced anaerobic co-metabolism of coal gasification wastewater via the assistance of zero-valent iron [J]. Journal of Water Process Engineering, 2021, 40: 101817.
- [6] SHEN J, DU Z, LI J, *et al.* Co-metabolism for enhanced phenol degradation and bioelectricity generation in microbial fuel cell [J]. Bioelectrochemistry, 2020, 134: 107527.
- [7] 李岩,王翠苹,姚义鸣. 以汽油为底物好氧共代谢三氯乙烯[J]. 环境工程学报, 2014, 8(3): 977-982.
LI Yan, WANG Cuiping, YAO Yiming, *et al.* Aerobic co-metabolism of trichloroethylene using gasoline as primary substrate[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(3): 977-982(in Chinese).
- [8] LI D, SONG L, FANG H, *et al.* Effect of temperature on the anaerobic digestion of cardboard with waste yeast added: dose-response kinetic assays, temperature coefficient and microbial co-metabolism [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 275: 122949.
- [9] 李俊,李芬芬,何彩彩,等. 生物处理技术去除难降解有机物的研究进展[J]. 应用化工, 2022, 51(2): 547-550.
LI Jun, LI Fenfen, HE Caicai, *et al.* Research progress of biological treatment technology for the removal of refractory organic compounds [J]. Applied Chemical Industry, 2022, 51(2): 547-550(in Chinese).
- [10] 滕菲,杨雪莲,李凤梅,等. 微生物对环境中难降解有机污染物共代谢作用[J]. 微生物学杂志, 2016, 36(3): 80-85.
TENG Fei, YANG Xuelian, LI Fengmei, *et al.* Microbial co-metabolism of persistent organic pollutants

- in environment[J]. *Journal of Microbiology*, 2016, 36(3): 80–85(in Chinese).
- [11] 陈利粉,宋盈,马建茹,等. 4-氨基安替比林分光光度法测定水中挥发酚的影响因素分析[J]. *中国资源综合利用*, 2022, 40(3): 22–24.
- CHEN Lifan, SONG Ying, MA Jianru, *et al.* Analysis of influencing factors in determination of volatile phenols in water by 4-aminoantipyrine spectrophotometry [J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2022, 40(3): 22–24(in Chinese).
- [12] 靳淑敏,齐鹏成,周娜,等. 蒽酮-硫酸比色法测定三黄糖敏汤中多糖的含量[J]. *中国药房*, 2015, 26(6): 811–812.
- JIN Shumin, QI Pengcheng, ZHOU Na, *et al.* Content determination of polysaccharides in Sanhuang tangmin decoction by anthrone-sulfuric acid colorimetry [J]. *China Pharmacy*, 2015, 26(6): 811–812(in Chinese).
- [13] 刘国洋,赵白航,李军,等. 好氧颗粒污泥降解苯酚[J]. *环境工程学报*, 2014, 8(9): 3645–3650.
- LIU Guoyang, ZHAO Baihang, LI Jun, *et al.* Phenol degradation by aerobic granular sludge [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, 8(9): 3645–3650(in Chinese).
- [14] ZHAO W, YOU J, YIN S, *et al.* Extracellular polymeric substances-antibiotics interaction in activated sludge: a review [J]. *Environmental Science and Ecotechnology*, 2023, 13: 100212.
- [15] CHEN R, REN L, SHAO J, *et al.* Changes in degrading ability, populations and metabolism of microbes in activated sludge in the treatment of phenol wastewater[J]. *RSC Advances*, 2017, 7(83): 52841–52851.
- [16] OLIVEIRA A S, AMORIM C L, MESQUITA D P, *et al.* Increased extracellular polymeric substances production contributes for the robustness of aerobic granular sludge during long-term intermittent exposure to 2-fluorophenol in saline wastewater [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2021, 40: 101977.
- [17] TANG W, WU M, LOU W, *et al.* Role of extracellular polymeric substances and enhanced performance for biological removal of carbonaceous organic matters and ammonia from wastewater with high salinity and low nutrient concentrations [J]. *Bioresource Technology*, 2021, 326: 124764.
- [18] HE Q, XIE Z, FU Z, *et al.* Effects of phenol on extracellular polymeric substances and microbial communities from aerobic granular sludge treating low strength and salinity wastewater[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 752: 141785.
- [19] SALA-TREPAT J, CHARLESEVANS W. The meta cleavage of catechol by azotobacter species [J]. *European Journal of Biochemistry*, 1971, 20(3): 400–413.
- [20] MARKELOVA N Y. Effect of toxic pollutants on *Bdellovibrio* [J]. *Process Biochemistry*, 2002, 37(10): 1177–1181.
- [21] FELDOLDI T, KEKI Z, SIPOS R, *et al.* *Ottowia pentelensis* sp. nov., a floc-forming betaproteobacterium isolated from an activated sludge system treating coke plant effluent [J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2011, 61(9): 2146–2150.
- [22] JIANG J, WANG Y, YU D, *et al.* Garbage enzymes effectively regulated the succession of enzymatic activities and the bacterial community during sewage sludge composting[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 327(1): 124792.
- [23] SUGAWARA Y, UEKI A, ABE K, *et al.* *Propioniciclava tarda* gen. nov., sp. nov., isolated from a methanogenic reactor treating waste from cattle farms [J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2011, 61(9): 2298–2303.

作者简介:陈浩然(1999–),男,贵州毕节人,硕士,主要研究方向为水污染控制理论与技术。

E-mail:791434074@qq.com

收稿日期:2021-11-23

修回日期:2022-05-30

(编辑:沈靖怡)